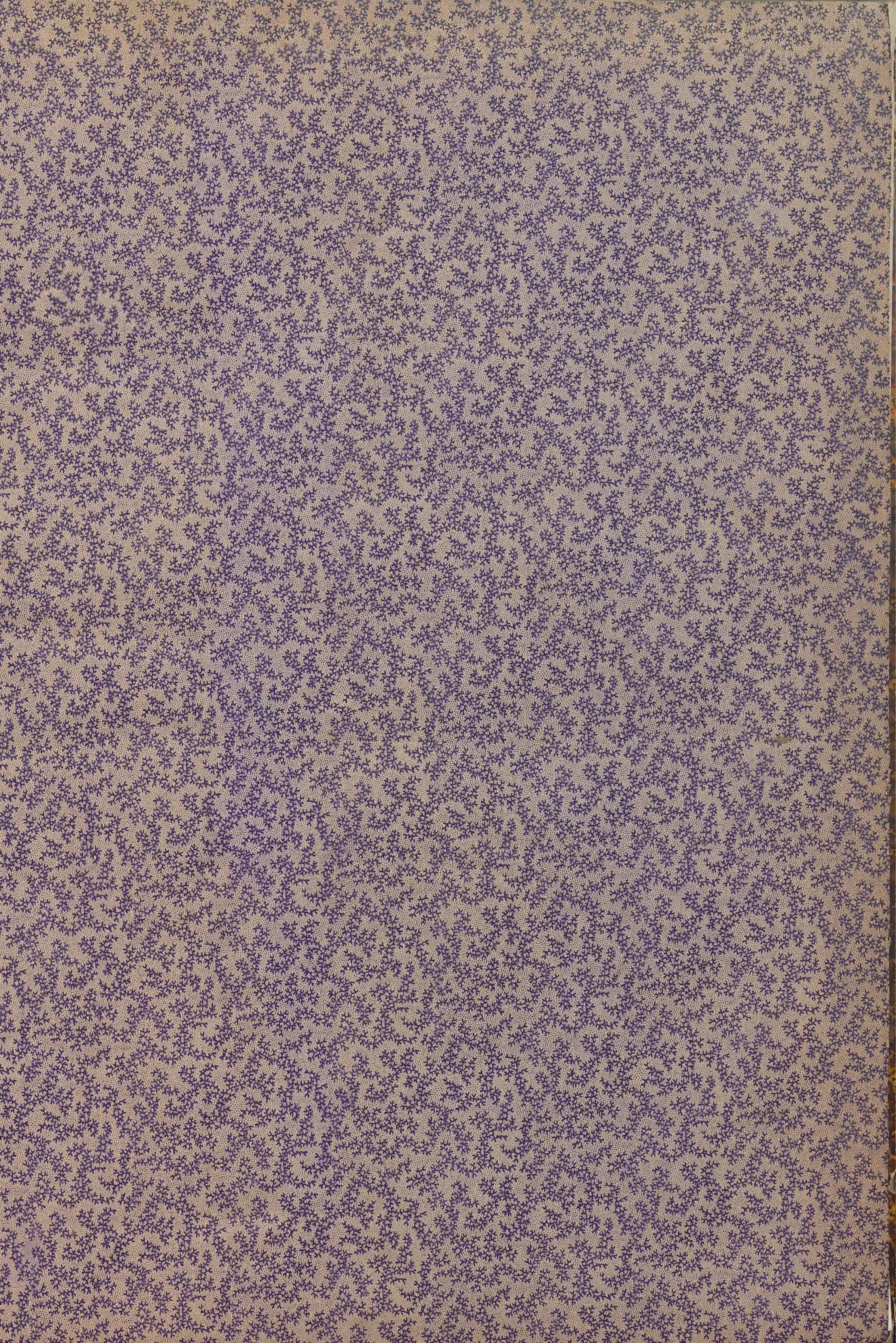
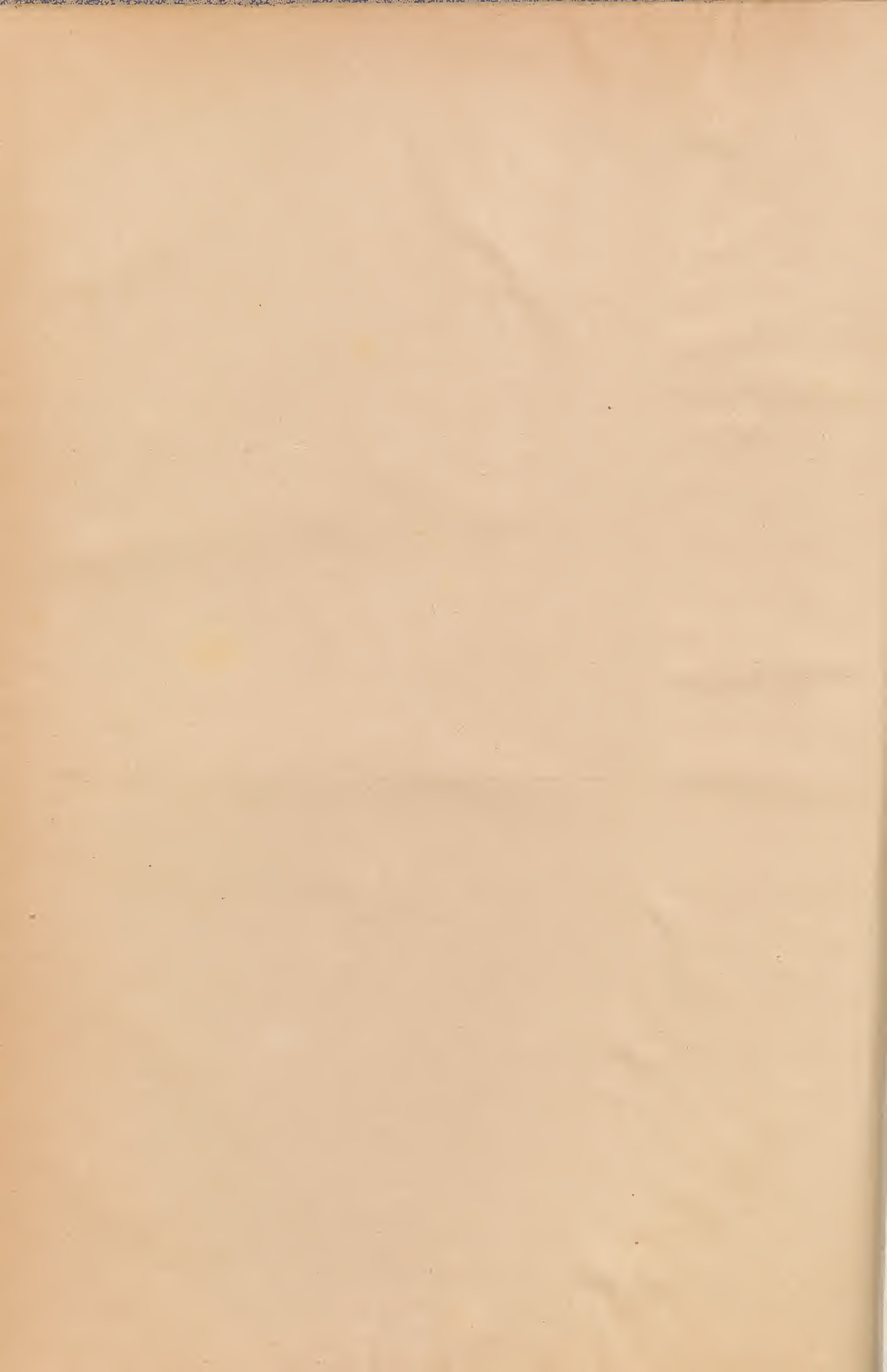








EL

# MUNDO FISICO




ESTABLECIMIENTO TIPOGRÁFICO-EDITORIAL
BARCELONA

EL

# MUNDO FISICO

POR

AMADEO GUILLEMIN

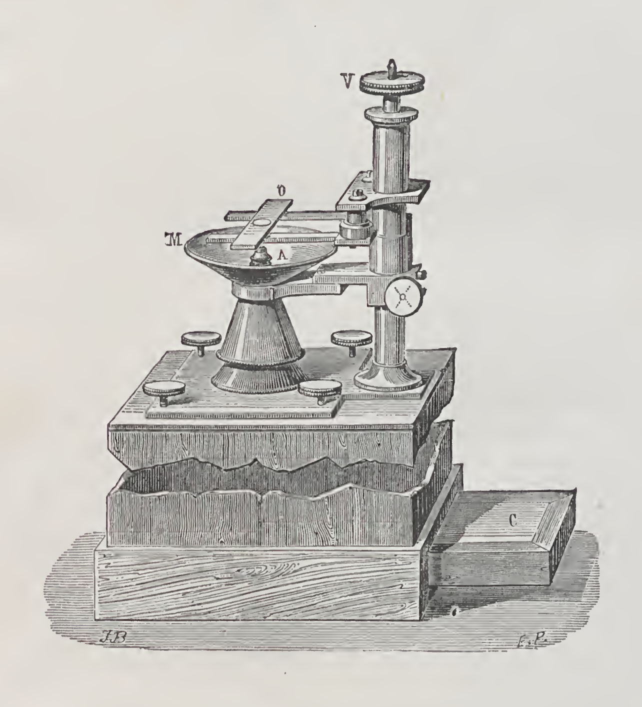
Traduccion de

D. MANUEL ARANDA Y SANJUAN

GRAVEDAD, GRAVITACION, LUZ, CALOR, ELECTRICIDAD, MAGNETISMO, ETC.

ILUSTRACION COMPUESTA DE NUMEROSAS VIÑETAS INTERCALADAS EN EL TEXTO

TOMO SEGUNDO




BARCELONA

MONTANER Y SIMON, EDITORES

CALLE DE ARAGON. NUMS. 309-311

1883

# INTRODUCCION GENERAL

> La naturaleza no es una masa inerte; para el que sabe comprender su sublime grandeza, es la fuerza creadora del universo, fuerza siempre eficiente, primitiva, eterna, que engendra en su propio seno todo cuanto existe, perece y renace alternativamente.
>
> (SCHELLING)

La presente obra tiene por objeto, como lo indica su título, la *Descripcion física del mundo*; pero el sentido que por lo general se da á estas expresiones es bastante vago, y como el lector podria creer, segun el punto de vista en que al pronto se colocase, que me propongo tratar de la universalidad de los fenómenos observables, ó bien circunscribirme á los fenómenos exclusivamente propios del globo terráqueo, lo que en el primer caso traspasaria demasiado los límites de mi programa, y en el segundo lo restringiria sobremanera, creo necesario definir y limitar con toda claridad el espacio que me propongo recorrer.

Esto es lo que procuraré hacer en esta introduccion general.

## I

De dos palabras se valian los antiguos para representar el conjunto de las cosas, palabras sinónimas, como se verá. Los griegos decian *cosmos* y los latinos *mundus*, que nosotros traducimos tambien por la voz *mundo*. Esta expresion ha perdido en parte para nosotros su significacion primitiva, pues siendo en la antigüedad inseparable de las ideas de belleza, ornamento, armonía, hoy tan sólo se refiere á la de un conjunto, de un todo, cuyas partes están enlazadas entre sí en virtud de una mutua dependencia (1). Por otra parte, la extension de la significacion de la palabra *mundo*, depende, segun es sabido, de las circunstancias en que se la aplica. Ora se quiere significar con ella la tierra entera, pero aislada del resto del Universo, ora el conjunto de los cuerpos celestes que componen el sistema cuyo astro predominante es el Sol, y en este caso se la puede aplicar tambien á cualquier otro sistema semejante, diciéndose en tal concepto los *mundos sidéreos*. En esta última acepcion puramente astronómica, decimos tambien el *Universo*, para designar la reunion de todos los sistemas, al ménos de todos los que son accesibles á la vista auxiliada por los instrumentos de óptica.

Finalmente, tambien usamos con frecuencia la palabra *naturaleza*, para designar el conjunto de las cosas. Tan pronto tomamos la Naturaleza en este sentido, es decir, como sinónimo del Universo ó del Mundo, como damos al mismo vocablo una acepcion filosófica, significando el órden ó el sistema de las leyes que regulan la existencia de las cosas y la sucesion de los séres; ó bien la consideramos como una especie de personificacion de la materia universal, como la potencia ó fuerza activa en virtud de la cual se desarrollan en su sucesion ordenada todos los fenómenos observables. Bajo este punto de vista la ha considerado Schelling, al dar la hermosa definicion que nos sirve de epígrafe, y que Humboldt se ha apropiado con razon en su *Cosmos*.

Así pues, Mundo ó Cosmos, Naturaleza y Universo, son las denominaciones generalmente usadas para designar el conjunto de las cosas y de los séres, de los fenómenos, de sus leyes y hasta de sus causas. Sea cualquiera la que prefiramos, la de Mundo por ejemplo, falta todavía saber en qué punto de vista

(1) *Quem* cosmon *Græci*, dice Plinio, *nomine ornamenti appellaverunt, cum nos, à perfecta absolutaque elegantia, mundum.* «Las lenguas, dice Littré, citando este pasaje del escritor latino, tienen á veces expresiones felicísimas. ¿Puede encontrarse otro apelativo que exprese, mejor que las palabras *cosmos* y *mundus*, las cuales significan órden, adorno, ornamento, la impresion experimentada por los helenos y latinos á la vista de este vasto conjunto que se mueve con extraordinaria regularidad y que despliega por la noche su manto de estrellas? En nuestras lenguas derivadas se ha perdido el sentido primitivo de esos vocablos, y el mundo, cualquiera que sea la idea fundamental que los latinos le atribuyeran, no es hoy más que el conjunto de las cosas del universo.»

(LA CIENCIA *bajo el punto de vista filosófico.*)

nos colocamos aquí para acometer su descripcion.

La ciencia, en su universalidad, se propone dos objetos; el conocimiento del mundo y el del hombre, y como consecuencia, el conocimiento de las relaciones del hombre con el mundo. Problemas formidables por su inmensidad, enigmas siempre misteriosos, oscuridades profundas, cuyas sombras retroceden indudablemente á medida que, merced á los conocimientos adquiridos, la luz de la ciencia se difunde por la duracion y por el espacio, pero que subsisten fatalmente en estado de problemas, de enigmas y de oscuridades, porque lo infinito nos rodea por todas partes. Un Descartes, un Leibnitz y un Kant por una parte, y un Newton, un Laplace y un Cuvier por otra, han podido muy bien estudiar con ánimo constante esas grandes cuestiones, procurando resolverlas, sin que parezca demasiado evidente la desproporcion entre los resultados obtenidos y la magnitud de la empresa. Pero hoy por hoy nadie puede envanecerse de haber conseguido darles una solucion completa, ni siquiera en un órden parcial de investigaciones. Cuanto más se ensancha la escena, más parece que se dilata el campo de lo infinito, precisamente por lo mismo que es tambien más extenso el dominio por tal modo entregado á la investigacion de la inteligencia humana. ¿Ni quién podria abrigar la pretension de poseer, y con mayor motivo de exponer el conjunto de los resultados adquiridos en cualquiera de las múltiples ramas de la ciencia?

Por fortuna, toda una mitad de este dominio (por cierto la más abstrusa, la más difícil y compleja), está fuera del programa de la presente obra. Al decir esto me refiero á la que tiene por objeto al hombre, individual ó colectivamente considerado. Además, tan sólo habremos de considerar un fragmento de la otra mitad, dejando aparte el estudio de los séres vivientes, y limitándonos al de los fenómenos que no dependen directamente de la vida.

Por consiguiente, en tan restringida acepcion se ha de entender aquí lo que llamamos *mundo físico*, si bien teniendo muy en cuenta que comprende todos los fenómenos del mismo órden, en cualquier punto del espacio en que ocurran ó sea cualquiera la época de la duracion en que se manifiesten, tanto si su asientc es un astro ó un sistema de astros, como si lo es un cuerpo inorgánico ó un sér organizado y viviente, bastando para ello que los fenómenos observados ó estudiados no sean en sí mismos fenómenos vitales. Por lo demás, á fin de quitar á estas consideraciones generales todo lo que de vago y oscuro pudieran tener, voy á hacer un rápido bosquejo, resumiendo en un cuadro concreto el mundo físico, tal como me propongo describirlo.

## II

¿Qué es el Universo? Dado el estado actual de las ciencias, ¿qué idea podemos formarnos de ese vasto conjunto? La Astronomía es la que va á responder á esta primera pregunta. El Universo es la reunion de los cuerpos celestes, de los astros, agrupados de modo que forman una multitud de sistemas. Estos cuerpos, aislados entre sí, ó al ménos separados por intervalos considerables teniendo en cuenta sus propias dimensiones, están animados de diferentes movimientos, periódicos por lo general, que efectúan indefinidamente en el seno de un medio ó espacio vacío de materia y que se llama Cielo. La Tierra misma es uno de estos cuerpos, y, lo mismo que los demás astros, se mueve perpetuamente en el éter celeste. El estudio de los movimientos de los astros, de su periodicidad y de su dependencia recíproca, ha sido largo tiempo el único y todavía es hoy el principal objeto de la ciencia astronómica. Merced á este estudio, continuado con tanta paciencia como constancia por espacio de siglos enteros, se ha podido conocer que un corto número de astros, los más próximos á nosotros y los que más nos interesan, componen un grupo ó sistema (el mismo del que la Tierra forma parte), y no son únicamente cuerpos lanzados al azar, y sin órden ni concierto, en el espacio que nos rodea. Quien dice sistema dice trabazon, dependencia, armonía. Y en efecto, nuestro sistema planetario, ó mejor dicho solar, se caracteriza por la dependencia comun que hace de todos los planetas, de los cometas y de cualesquiera agregaciones de la materia de que se compone, otros tantos satélites de un cuerpo central y preponderante, foco de luz y de calor, que es el Sol. Una misma ley rige los movimientos particulares de todos estos cuerpos, una misma fuerza, la gravitacion, los mantiene en sus órbitas, y motiva todas las variaciones periódicas ó seculares que experimentan los elementos de estas órbitas; una misma hipótesis sumamente probable, sobre el orígen y formacion del Sol, de los planetas y de sus satélites, nos induce á considerarlos como hijos de una misma familia, como productos de una lenta evolucion, cuyas edades se cuentan por centenares de millones de años.

Gracias á los perfeccionamientos y progresos de la ciencia, hoy conocemos las leyes que regulan los fenómenos celestes, limitados al mundo solar, con una precision tal que se puede calcular con mucha anticipacion todas sus fases. La astronomía planetaria ha llegado por tal con-

cepto á ser el monumento más grandioso erigido á la gloria del espíritu humano por el genio de las ciencias matemáticas: geometría, mecánica y análisis. Pero, paralelamente á esta rama trascendental de la Astronomía, hay otra rama, la Astronomía física, de la cual han brotado retoños cada vez más floridos de tres siglos á esta parte. La física se ha dedicado al estudio de la constitucion íntima de los cuerpos celestes, y la óptica ha suministrado un contingente considerable de observaciones relativas á regiones del cielo nunca hasta entónces exploradas.

Las estrellas, tán extraordinariamente distantes de nuestro sistema que su luz necesita años enteros para cruzar el más corto de los intervalos que de ellas nos separan, no fueron consideradas por espacio de mucho tiempo, por lo que respecta á la astronomía planetaria, sino como puntos de referencia, preciosos sin duda alguna, toda vez que, á no ser por ellas, jamás se habria llegado á conocer el sistema de los movimientos reales de que están animados los cuerpos planetarios. Pero el telescopio, aplicado al estudio del cielo sidéreo, nos ha hecho las revelaciones más asombrosas sobre la constitucion misma del Universo. No tan sólo ha centuplicado á los ojos del hombre el número de los soles cuyos fúlgidos destellos espolvorean el espacio infinito, sino que ha permitido reconocer la existencia de grupos de soles que gravitan unos en torno de otros, y forman de este modo sistemas binarios, ternarios, múltiples; habiendo demostrado además que el mismo órden y armonía que han predominado en el arreglo y disposicion de nuestro mundo planetario, regulan los sistemas superiores, maravilloso testimonio de esa gran ley universal de la variedad en la unidad, que caracteriza todos los fenómenos de la naturaleza.

De los sistemas de estrellas dobles y múltiples se pasa á las más vastas asociaciones, á esos cúmulos estelares, en que los individuos se cuentan por millares. Esas nebulosas, apiñadas por efecto de la distancia en espacios imperceptibles, no se presentan á la vista, y á veces en los anteojos de mucho alcance, sino como nubes confusas ó resplandores inciertos; pero los instrumentos de mayor poder óptico acaban por resolverlas en puntos luminosos. La mente se confunde y extravia cuando pretende enumerar esos sistemas de soles, penetrar en esas insondables profundidades de los abismos celestes, calcular sus dimensiones, formarse una idea de esos millones de mundos, figurarse que cada uno de ellos es el foco de otros cuerpos invisibles análogos á nuestros planetas y que llevan como ellos en su superficie el movimiento, la vegetacion, la vida.

¿A quién ó á qué debemos el conocimiento de esos remotísimos universos? A la luz, cuyas ondulaciones rápidas, excitadas por las vibraciones de sus propios focos, agitan y conmueven el éter, propagándose en seguida por él sin confundirse y sin sufrir alteracion, á tan considerables distancias. Las mismas ondas etéreas, emanadas de cada uno de esos mundos, son las que, analizadas delicadamente por un método admirable, proporcionan á la ciencia los medios de poder asegurar cuál es el estado físico y áun el químico del foco luminoso y cuáles las sustancias metálicas ó de cualquiera otra clase que se hallan en incandescencia en esos focos.

Así, pues, gracias á las profundas investigaciones de los observadores, de los geómetras y de los físicos, los fenómenos astronómicos nos inician por una parte en la estructura general del universo, compuesto de una agregacion sin fin de mundos agrupados por sistemas de diferentes órdenes; y por otra, nos permiten examinar cada uno de esos mundos, para descubrir en ellos, ya analogías ó ya diferencias marcadas con el nuestro. El telescopio nos hace pasar desde la Luna, cuya topografía, montañas y volcanes conocemos hoy mejor que ciertas regiones de la Tierra misma, á la estructura de los planetas y del Sol; descubrimos en ella los satélites múltiples de Júpiter, los de Saturno y Urano, los anillos del segundo de estos globos gigantescos, las tierras, mares y nieves de los polos de Marte. Los huracanes formidables, las erupciones y explosiones hidrogenadas del océano inflamado del Sol no tendrán en breve secretos para nosotros. La idea tan grandiosa, las admirables nociones que la ciencia nos permite tener ya sobre el conjunto de las cosas, resaltan plenamente de la descripcion detallada del cielo, á la que hemos dedicado ya un volúmen, que muy bien puede considerarse como la introduccion ó como el complemento del Mundo físico.

Al regresar de esas excursiones por el espacio sin límites al globo en que vivimos y que nos sirve de observatorio, nos encontramos con toda una serie de hechos con los que estamos sin duda más familiarizados, pero cuya íntima conexion con los movimientos de los cuerpos celestes y con las leyes á que obedecen habremos de demostrar. Tales son los que ocasiona el doble movimiento de la Tierra, ó sea el de rotacion sobre su eje y el de traslacion alrededor del Sol. Combinando con ellos los de nuestro satélite la Luna, tendremos que dar cuenta de las alternativas del dia y de la noche, de las de las estaciones, de las variaciones causadas por las diferencias de latitud en las distintas épocas del año, y explicar la sucesion

de los eclipses; y luégo, ocupándonos del suelo mismo del planeta, dar las razones astronómicas del fenómeno de las mareas.

Así pasaríamos del cielo á la Tierra, que flota á su vez en el cielo mismo, si otros fenómenos temporales, accidentales los unos, periódicos los otros, no nos retuviesen todavía en el dominio de la astronomía. Nos referimos á las estrellas fugaces, á esos rastros de luz que de cuando en cuando surcan el cielo de nuestras noches, unas veces aisladas, y en otras épocas, en compactas legiones, á modo de enjambres ó lluvias; efímeras apariencias cuya naturaleza se ha desconocido mucho tiempo, pero que la astronomía ha acabado por reivindicar, demostrando hoy que puede proceder del paso periódico de largas masas de corpúsculos planetarios. Recientes investigaciones nos han dado á conocer el vínculo que une á estos fenómenos singulares con las apariciones de los cometas, y en efecto, estos meteoros no deben ser sino fragmentos de sustancia cometaria, dispersados ó desprendidos por la influencia de las masas de los planetas.

Por último, á un orígen análogo, ya que no idéntico, deberán atribuirse las piedras que caen del cielo, cuya curiosa historia es uno de los más interesantes capítulos de una ciencia apénas bosquejada; pudiéndose dar á esa ciencia el nombre de *Física intercósmica*, porque constituiria una especie de tránsito entre la astronomía ó física celeste y la física del globo ó terrestre.

## III

Al hacer esta enumeracion rápida, y por cierto sobrado incompleta de los fenómenos del mundo físico, hemos venido poco á poco á parar á los que interesan á nuestro planeta, y cuya historia natural particular componen. Al llegar á este punto, á medida que la generalidad de las ideas decrece y va contrayéndose por decirlo así, aumenta el interés que prestamos á todo cuanto más particularmente nos atañe, pues en efecto, se trata de la Tierra misma, del astro que nos sustenta, de esa *alma parens*, nuestra cuna en los tiempos primitivos y futura tumba de la humanidad entera. ¿Llegaremos un dia á difundir algunos resplandores, valiéndonos de la antorcha de la ciencia, sobre los primeros orígenes del mundo, sobre las fases sucesivas por que ha debido pasar ántes de hallarse en estado de recibir el primer soplo de vida, el primer gérmen de los séres organizados ó vivientes, la vida progresiva, embrion de las faunas y floras que hoy viven, crecen y se extienden por su superficie y de las que tan numerosos vestigios contienen las capas profundas de la corteza terrestre? Al reconstituir la inteligencia humana, á fuerza de trabajo, de paciencia, y con el rigorismo y reserva de la verdadera ciencia, los materiales de esta historia, ¿logrará alguna vez trazar de nuevo, en la prolongada serie de las edades geológicas, los lineamientos de la historia misma del hombre, de su primera aparicion en la Tierra? Problema es este cuya solucion podemos prometernos, pero cuyo estudio exigirá indudablemente el concurso de los progresos simultáneos de nuestros conocimientos en todas las ramas de las ciencias físicas y naturales. Aun cuando, por lo tanto, no entra en su conjunto nuestro programa restringido, convendrá reseñar ligeramente lo que, en la descripcion del MUNDO FÍSICO, se relaciona más particularmente con la historia de la Tierra, y por consiguiente con nuestra propia historia.

El órden, la regularidad, la permanencia, parecen ser el carácter peculiar de los fenómenos que ocurren en los cielos. Tan sólo nos es dado observarlos de léjos, y la lentitud con que se suceden no nos permite consignar sino muy á la larga las perturbaciones ó variaciones que sufren, escapándosenos los detalles. Lo contrario sucede cuando consideramos los hechos físicos de que la superficie de la Tierra es teatro; la continua variedad, las incesantes mudanzas que cada uno de ellos ofrece, acrecen más y más á causa del enlace inevitable de los efectos dimanados de varias causas y de los innumerables detalles que la proximidad en que de aquella estamos nos obliga á observar á la vez. Y esto es más particularmente cierto respecto de todo cuanto tiene relacion con la envolvente gaseosa ó aérea del globo, y tambien lo es, aunque en grado menor, relativamente á la parte líquida ó á los mares; únicamente el suelo, con sus horizontes ó capas casi estables, presenta un asunto de estudio ménos variable. Todo esto forma el dominio de la ciencia llamada *física del globo* ó *meteorología*, ciencia sobrado imperfecta todavía, en razon de lo complejo de los hechos que estudia, de los escasos medios de observacion con que ha contado hasta el presente y tambien del período relativamente corto trascurrido desde las primeras investigaciones sistemáticas efectuadas por tal concepto.

Tambien nos proporciona la astronomía la primera base sólida de la historia del globo terráqueo. La forma de este globo, sus dimensiones, su masa y densidad vienen á ser su punto de partida. Sin exponer detalladamente los procedimientos merced á los cuales se ha podido averiguar otros datos importantes, tendremos ocasion de decir lo que acerca de ellos se sabe en el estado actual de la ciencia. No

dejará de ser interesante el demostrar cómo se ha reconocido poco á poco que el globo terráqueo, al que se suponia esférico, está en realidad aplanado hácia los polos de su rotacion; cómo su forma, semejante á la de una elipsoide de revolucion, dista mucho de tener en todos sentidos la regularidad de este sólido geométrico, teniendo meridianos desiguales y paralelos más ó ménos distantes, como su ecuador mismo, de la forma circular.

A continuacion seguirá el estudio de la configuracion de las masas continentales, de las proporciones relativas de las tierras y de los océanos, del relieve de aquellas y de las depresiones ó profundidades de éstos, de la forma y extension de las vertientes de los mares y de las cuencas de los rios, etc.; pero como los hechos relativos á estas cuestiones son más bien de incumbencia de la geografía física, no pueden entrar en nuestro plan sino en cuanto se refieren á las leyes generales á que ha obedecido la formacion del globo terráqueo. Lo propio sucede por lo que respecta á la descripcion detallada de la estructura interna de este suelo, á la composicion y sucesion de las capas que forman la corteza sólida de la Tierra; y con mayor motivo, al análisis de las rocas y terrenos, y á su estudio bajo el punto de vista de los vegetales y animales que en sí encierran. La geología, la mineralogía, la cristalografía y la paleontología son las ciencias especiales que estudian todos estos hechos, y que, basándose en la comparacion de los mismos, se esfuerzan por remontarse del estado presente á las edades antiguas con objeto de poder rehacer la historia del pasado de nuestro globo. Nosotros nos contentaremos con tomar de ellas los datos necesarios para la solucion de estos problemas tan controvertidos todavía, y en su vista procuraremos deducir la edad de la Tierra, las evoluciones por que ha pasado, su actual estructura interna y las conjeturas que es posible hacer sobre sus trasformaciones futuras.

Aun cuando la esfera terrestre, considerada en su conjunto, parezca haber llegado á una fase de estabilidad por lo ménos relativa, los cambios que todavía sufre, ya sea por la accion de las fuerzas internas, ó ya por la accion mucho más lenta, pero continua de los agentes exteriores, servirán, á no dudarlo, para construir los cimientos de la ciencia del pasado de nuestro planeta. Y por este concepto ¡cuán interesante no es estudiar los volcanes en actividad, analizar los líquidos y los gases que despiden en sus convulsiones intermitentes! Muchas dudas subsisten todavía sobre las consecuencias que deben deducirse de los fenómenos volcánicos, relativamente á la cuestion siempre controvertida del estado físico actual del núcleo terrestre. ¿Se halla en fusion ígnea en toda su masa, á partir de una escasa profundidad, como se ha sostenido largo tiempo, y como muchos lo creen todavía, ó bien el suelo, la costra solidificada que nos sustenta, tiene un espesor considerable, como lo sostiene de algun tiempo á esta parte cierto número de astrónomos, geólogos y físicos? En la segunda hipótesis, deberíamos suponer para explicar el orígen de las lavas, de esas acumulaciones á veces enormes de materia vitrificada, fundida, incandescente, que en los terrenos donde están alineados los volcanes, existen á trechos lagos interiores de dicha materia, quedando siempre por averiguar de dónde procede el intensísimo calor que es capaz de mantener esos lagos en tal estado. Todas estas cuestiones tan interesantes, pero tan oscuras todavía, siguen sirviendo de asunto á las controversias de la ciencia, pero no pertenecen únicamente al dominio de la geología, y por consiguiente para examinar estos problemas habria que apelar tambien á la física, á la química, á la astronomía misma y á la termodinámica, parte de la física que ha sido reciente objeto de descubrimientos importantes.

Más sólido es el terreno en que la ciencia se coloca para describir los fenómenos actuales, y al decir esto nos referimos á los fenómenos puramente físicos de que la Tierra es teatro: sus causas son múltiples, y sus efectos se encuentran necesariamente confundidos en la realidad. Pero la física ha sabido separarlos, haciendo así fácil la distincion de los fenómenos lo mismo que la de sus causas. La gravedad, el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo forman, por lo tanto, las divisiones naturales del asunto de que nos ocupamos; pero en el globo terráqueo entero, en su superficie ó en su envolvente aérea, será donde estudiaremos esos agentes ó por lo ménos los fenómenos que engendran segun su distribucion natural, las variaciones periódicas ó accidentales á que están sometidos, las leyes de esta distribucion y estas variaciones, en una palabra, todo cuanto constituye, como se ha dicho ya, la *física terrestre* y *la meteorología*.

¿Qué interés puede despertar en nosotros la gravedad, á primera vista considerada, por lo que respecta á las cuestiones puramente relativas á la constitucion del globo terráqueo? ¿Acaso no obra esta fuerza de un modo constante, invariable, uniforme? En un mismo lugar de la Tierra, seguramente que sí; pero de un punto á otro más elevado ó más bajo de su superficie, de una latitud á otra, la gravedad varía; y por otra parte su intensidad está con-

trabalanceada con alguna desigualdad por la fuerza centrífuga originada por la rotacion del planeta. Además, la forma misma del esferoide está ligada á estas variaciones, siendo interesante conocer en virtud de qué ley se ha agregado la materia de que está formada la Tierra, para dar densidades desiguales á las regiones centrales y á las capas de suelo, para acumular en las inmediaciones del ecuador y en el ecuador mismo esa especie de hinchazon ó dilatacion de nuestro globo comprobada por las medidas geodésicas.

Tambien hay cierto número de cuerpos celestes de figura esferoidal: Marte, y sobre todo Júpiter y Saturno, están aplanados en sus polos de rotacion. Comparando las formas de estos globos con la de la Tierra, y teniendo en cuenta las diferencias de rotacion, densidad, etc., se observan interesantes analogías entre los estados físicos actuales de estos diferentes planetas.

¿No es cosa interesante por demás el conocer la conexion física que hace depender las mareas de la accion de la gravedad del Sol y de la Luna sobre la masa flúida del Océano, que demuestra asimismo una relacion de causa á efecto entre la precesion de los equinoccios, la nutacion y la misma accion de la gravedad en la dilatacion ecuatorial del globo? Otras perturbaciones en los elementos astronómicos de la órbita terrestre proceden de causas análogas, y resultan de la accion de la misma fuerza de la gravitacion ejercida por los planetas; tales son las que afectan á la excentricidad de la órbita de la Tierra, y tambien á la inclinacion de su eje. Estas lentas variaciones tienen evidentemente por consecuencia otras variaciones correspondientes en las estaciones y en los climas, habiéndose creido, y no sin razon, hallar en ellas una explicacion, por lo ménos parcial, de ciertas revoluciones del globo, por ejemplo, la de los períodos glaciales.

La distribucion del calor en la superficie de la Tierra y en el interior de las capas del suelo accesibles á la observacion, así como las probabilidades que de ellas resultan para el estado térmico del núcleo, se deducen de una nueva serie de fenómenos tan interesantes por lo ménos como la gravedad, para la historia del pasado del planeta, y en todo caso sumamente importantes para conocer su constitucion física actual. El calor estudiado en las partes flúidas, en los océanos y en la atmósfera es el que desempeña un papel más principal bajo este último punto de vista. ¡Qué admirable asunto de estudio para el hombre científico, qué espectáculo tan variado para el pintor ó el poeta nos ofrecen las corrientes marinas, los grandes movimientos de la atmósfera, las perturbaciones locales ó transitorias de que esas húmedas masas son, por decirlo así, teatro perpetuo, las tormentas, los ciclones, los vientos y las lluvias, las trombas, el granizo, con todo su séquito de fenómenos eléctricos, de truenos, relámpagos y rayos! Desde las soledades glaciales del polo en donde brillan las auroras hasta las zonas tropicales en las que resplandece una magnífica y exuberante vegetacion, se encuentran por transiciones insensibles todos los climas, pasando por esas regiones templadas tan apacibles, en las que todo parece dispuesto para que sean residencia privilegiada de las sociedades humanas y para el más completo desarrollo de la civilizacion.

Una de las cuestiones más á propósito para excitar nuestra curiosidad, entre todas cuantas nos permite abordar la ciencia de la física del globo, es sin duda la parte que el calor y la luz solar, las corrientes eléctricas y magnéticas, la distribucion de los continentes y de los mares, la naturaleza del suelo y su configuracion, pueden tener en dicha variedad de climas, floras y faunas. Tambien es una de las más interesantes que resolver en cuanto atañe á la satisfaccion de nuestras necesidades, y á la direccion que debemos dar á nuestra actividad colectiva en vista de los progresos sociales. Por estas razones formará parte esencial del programa que nos hemos trazado relativamente á la descripcion del MUNDO FÍSICO y de sus leyes.

## IV

En meteorología, lo propio que en las demás ciencias naturales, hay dos maneras de considerar los hechos, dos puntos de vista desde los cuales se pueda y deba estudiar los fenómenos, sin lo cual la ciencia quedaria incompleta.

Estos fenómenos se pueden observar, estudiar y describir en su conjunto, en su sucesion ó distribucion en la superficie del globo, en sus relaciones de simultaneidad ó concordancia con los fenómenos afines, ó tambien en sus relaciones aparentes ó reales con los que son exteriores á la Tierra.

Tal es el primer punto de vista que podria llamarse geográfico, ó mejor dicho *cósmico* y que constituiria la primera parte de la ciencia particular que examinamos.

Pero, si bien podemos descubrir de tal modo las leyes generales de la meteorología, esto no nos instruye acerca de la naturaleza de los fenómenos, es decir, acerca de las condiciones físicas ó mecánicas en que tienen orígen. Por consiguiente, el segundo punto de vista que debemos considerar consiste en averiguar cuáles son estas condiciones, en penetrar el sentido íntimo de los hechos, en llegar á conocer su causa, en relacionarlos en todos sus detalles

con los agentes físicos conocidos, y en una palabra, en hacer la teoría de cada clase de fenómenos. Este punto de vista, no ménos esencial que el primero, nos conduce al descubrimiento de una serie de leyes especiales, cuyo conjunto constituye la segunda rama de la ciencia meteorológica, la que podria llamarse meteorología física. La *física del globo* ó física terrestre, es la reunion de estas dos ciencias, complemento la una de la otra.

Citemos uno ó dos ejemplos á propósito para que se comprendan mejor estas generalidades. Fijémonos en la lluvia.

Podemos estudiar ante todo las lluvias considerándolas segun su distribucion anual en la superficie del globo, ya en los continentes ó bien en los mares, y luégo segun esta misma distribucion en las diferentes épocas del año. Se las puede estudiar tambien con relacion á la cantidad de agua caida en cada lugar, ó en su coincidencia con los demás fenómenos meteorológicos, como por ejemplo los vientos reinantes. En todo esto no se considera la lluvia sino como fenómeno general, como dato de la historia meteorológica del planeta: es el primer punto de vista, el punto de vista *cósmico.*

Si, por el contrario, vemos en la lluvia un fenómeno particular, procuramos averiguar las condiciones físicas que la producen, y para esto tenemos en cuenta la influencia de la presion atmosférica, el estado higrométrico y la temperatura del aire, haciendo abstraccion de toda consideracion local, entónces nos proponemos establecer la teoría física de la lluvia, y nos colocamos por lo tanto en el segundo punto de vista de que ántes hemos hablado, esto es, en el punto de vista *físico.*

Podríamos hacer análoga distincion respecto de las auroras boreales ó polares, cuya periodicidad, frecuencia, coincidencia con otros fenómenos meteorológicos y hasta cósmicos es fácil observar, ó cuya naturaleza física nos proponemos conocer estudiando el fenómeno en detalle y procurando averiguar las relaciones que tenga con el magnetismo terrestre, la electricidad, etc. Y así de la mayor parte de los fenómenos que se estudian en meteorología, como los vientos y la presion barométrica, los huracanes y temporales, las variaciones de temperatura, etc.

## V

Si el lector tiene á bien trazar de nuevo en su imaginacion el cuadro de los fenómenos naturales que acaban de desplegarse ante su vista, verá que el órden que hemos seguido va de lo general á lo particular, del conjunto que abarca el universo entero á los detalles más circunstanciados, descendiendo de los mundos sidéreos al mundo solar, luégo á los planetas y por fin á la Tierra. Del propio modo, al llegar á nuestro globo hemos considerado ante todo los hechos físicos generales para proceder á un análisis cada vez más minucioso de los fenómenos. Pero es obvio que al llegar aquí penetramos en el terreno de una ciencia nueva, cuyo objeto consiste en la investigacion de las leyes por que se rigen todos los fenómenos hasta entónces revistados, y no ya como formando parte de tal ó cual sistema de cuerpos, sino considerados como manifestaciones de los agentes ó de las fuerzas naturales, en un lugar cualquiera del universo y en cualquiera época del tiempo. Esta ciencia no se propone ya la descripcion ó historia natural del mundo físico, sino que tiene por objeto descubrir su mecanismo, es decir, que despues de haber establecido las leyes universales de la materia, procura conocer sus causas, relacionándolas desde luégo con un corto número de agentes. Estos agentes, tanto si difieren esencialmente unos de otros, como si se les puede atribuir á una causa sola ó á un número menor de causas, son: la *Gravedad* ó *Gravitacion*, las *Fuerzas moleculares*, el *Calor* y la *Luz*, el *Magnetismo* y la *Electricidad*, y nadie ignora que se da en particular el nombre de FÍSICA (1) á la ciencia que estudia los fenómenos y las leyes de dichos agentes.

Esta denominacion, cuya etimología estricta tiene un sentido mucho más lato (*fisis*, en griego, designa la naturaleza entera), ofrece para nosotros la ventaja, dada la significacion restringida que le atribuyen los modernos, de corresponder al título general de esta obra y de precisar su alcance. Y en efecto, todos los fenómenos que habremos de describir están de un modo ú otro en conexion con una ley de física, dependen de alguno de los agentes llamados gravedad ó gravitacion, atraccion molecular, calor ó luz, magnetismo ó electricidad.

Puede verse de la misma ojeada que descendiendo de los fenómenos comprensivos del conjunto más vasto al análisis de los hechos de detalle más particulares, se llega por el contrario á leyes cada vez más generales. Si en virtud de un progreso inesperado de la ciencia se pudiera llegar á un grado de abstraccion mucho mayor, penetrar el mecanismo más íntimo de la materia ó de los cuerpos, tal vez se acabaria por descubrir la ley universal que rige el mundo

(1) A lo ménos en Francia, en Alemania y en los países de lengua latina. En Inglaterra se comprende con la denominacion general de *Filosofía natural* todas las ciencias á las que nosotros damos el nombre de *físicas*: Matemáticas aplicadas, astronomía, física, química, geología, etc. *Physic* se dice de la medicina; *physician* es un médico.*—(Nota del autor.)

* En algunas localidades de España y sobre todo en los cuerpos del ejército se da tambien el nombre de físicos á los médicos. (N. del T.)

físico. Más de un filósofo ó de un sabio ha intentado resolver este grande enigma; pero hasta el presente no se ha pasado de hipótesis: la observacion y el método experimental han tropezado en vano con las dificultades, cuando no con las imposibilidades del problema. ¿Se le llegará á resolver? Nadie podria hoy asegurarlo, pero tampoco negarlo, con fundamento.

De todos modos, debemos penetrarnos bien de la idea de que el estudio preciso, el análisis riguroso de los fenómenos más sencillos en la apariencia, de los más insignificantes algunas veces (al ménos así los creemos), pueden inspirarnos las miras más elevadas sobre el mundo, sobre su constitucion presente y su historia pasada ó futura. No hay nada que nos parezca tan trivial como ver desprenderse una piedra de una roca y precipitarse en un barranco; y sin embargo, el estudio científico de tan sencilla circunstancia condujo á Galileo al descubrimiento de las leyes de la gravedad terrestre, y á Newton al de la gravitacion universal. Otros astrónomos, observando minuciosamente las situaciones de las componentes de una estrella doble acaban por averiguar que estos dos soles gravitan uno en torno de otro, y que las leyes de sus movimientos son las que regulan los movimientos planetarios, ó los de la Luna alrededor del globo terráqueo. Pues la misma ley es la que determina la trayectoria de un cuerpo grave en la superficie de la Tierra. Esos fenómenos grandiosos, que necesitan siglos enteros para realizarse en las remotas regiones del mundo sidéreo, y que se miden en el espacio por millones de millones de leguas, tienen el mismo principio, la misma causa que el flujo y reflujo de las mareas, que la caida de una piedra ó el curso de las aguas de un rio.

Hoy por hoy se tiene por muy probable que la incandescencia de las estrellas, la del Sol, foco prodigioso de calor y de luz, es un fenómeno de la misma naturaleza que la caida de una piedra; y en efecto, esto es cierto, si se prueba que el orígen de la incandescencia del Sol y de las estrellas es la trasformacion en calor de la fuerza de la gravitacion misma. Estando diseminada en un principio, hace millones de siglos, la materia que forma esos mundos á modo de nebulosidades que ocupaban en el éter espacios inmensos, habiéndose condensado poco á poco y precipitádose con creciente rapidez hácia el centro principal de la condensacion, ha podido resultar que toda fuerza viva con que la gravitacion animaba sus diferentes partes se haya trasformado progresivamente en calor, en vibraciones caloríficas ó luminosas. Y la masa condensada é incandescente, repercutiendo entónces á su vez estas vibraciones en el éter, irradia en todas direcciones; devuelve á lo infinito, aunque en forma diferente, la fuerza viva que tiene la gravitacion por orígen: la nebulosa se ha trasformado en sol.

¿Por ventura no ha conseguido la ciencia el resultado maravilloso de poder averiguar cuál es la constitucion química de los cuerpos celestes distantes de nosotros millares de millones de leguas, resultado obtenido tambien mediante el análisis minucioso de la luz de los focos y la comparacion del espectro solar con los espectros de los cuerpos simples ó compuestos? Eso de poder afirmar que la atmósfera solar es hidrógeno incandescente, que tales ó cuales metales entran en la constitucion del astro, que Sirio contiene sodio, hierro, etc., ¿no es una asombrosa consecuencia de una simple observacion de física, efectuada con los medios más exactos, pero tambien escasos en número, en el recinto de un laboratorio?

Y es que los hechos más insignificantes, bien observados y rigurosamente analizados, suelen tener una importancia inmensa en lo que se refiere al problema que las ciencias de consuno procuran, ya que no resolver íntegramente, al ménos dilucidar cada vez más; conocer el mundo, dar una explicacion razonada de él, en una palabra, hacer la teoría del Universo.

Esta idea, este propósito va tomando creces de siglo en siglo, á medida que progresa la ciencia; pero no ha adquirido un carácter verdaderamente positivo hasta que se ha constituido en el verdadero terreno de la observacion experimental. A no haber sido por las teorías de la física moderna comprobadas por las ciencias matemáticas, nos hallaríamos todavía en el campo tan vago de las hipótesis ó más bien de los sistemas, ó mejor aún, de los puros ensueños.

Así pues, el cuadro del MUNDO FISICO debe empezar á desplegarse por la exposicion de la física general, por la descripcion de los fenómenos que estudia esta ciencia, y por la demostracion de las leyes á que obedecen. Partiendo de aquí, y haciendo una serie de estudios cuyo órden será precisamente el contrario del que acabamos de seguir, llegaremos poco á poco á la física del globo terráqueo, á la descripcion del mundo de que la Tierra forma parte, y finalmente á la del universo visible.

---

# LA LUZ

## PARTE PRIMERA

### LOS FENÓMENOS Y SUS LEYES

Entre el Sonido, que acabamos de estudiar, y la Luz, de la que ahora vamos á ocuparnos, no hay al parecer ninguna analogía, ninguna conexion, como tampoco parece haberlas entre los fenómenos sonoros y los de la gravitacion ó de la gravedad. Sin embargo, la ciencia nos enseña que la sensacion de la luz la produce la impresion en nuestra retina de una serie de ondulaciones sumamente rápidas emanadas de los focos luminosos, ondulaciones excitadas y desarrolladas á su vez por las vibraciones sincrónicas de que son orígen esos mismos focos, y que se propagan en el seno de un medio eminentemente flúido y elástico que llena todo el espacio, todo el éter. Del propio modo resulta el sonido, segun hemos visto, de las vibraciones moleculares de los cuerpos elásticos, y se propaga en medios como el aire, en forma de ondas esféricas, hasta el órgano del oído.

Así pues, la luz, lo propio que el sonido, es una especie particular de movimiento vibratorio, y en breve veremos que esta analogía subsiste hasta en el enunciado de las leyes de la propagacion de las ondas luminosas, leyes que se formulan poco más ó ménos como las relativas á las ondas sonoras. Finalmente, así como los sonidos se distinguen entre sí por ciertas propiedades, como la intensidad, el tono y el timbre, que dependen de las condiciones en que se efectúa el movimiento vibratorio, así tambien la luz presenta variaciones de brillo, de color y de tonos que proceden de causas muy parecidas.

Con todo, entre ambas clases de fenómenos media, además de notables diferencias de medida, otra muy capital, cual es la de que el sonido exige para su produccion y propagacion el intermedio de la materia ponderable, al paso que la luz tiene su orígen y su vehículo en un medio imponderable. Pero por otra parte un mismo principio, la elasticidad, sirve de punto de partida para la teoría de la luz lo propio que para la del sonido, siquiera esta elasticidad sea en la una la molecular de los cuerpos, y en la otra, la del éter.

Juzgamos oportuno consignar de antemano estas consideraciones generales, porque permiten establecer cierta analogía entre dos ramas de la ciencia al parecer extrañas entre sí, hacer patente el lazo que une los distintos fenómenos del mundo físico, y reconstituir, en parte al ménos, la unidad que se podria creer destruida en cierto modo por las necesidades del análisis científico. Verdad es que no siempre puede hacerse esta reconstitucion, y ya hemos visto que apénas si se vislumbra el momento en que los fenómenos de la gravitacion podrán relacionarse, como lo están ya los de la luz y el calor, y probablemente los de la electricidad y el magnetismo, con un mismo principio universal, con un solo agente físico, el éter.

# CAPÍTULO PRIMERO

## LA LUZ EN LA NATURALEZA

### I

### LOS FENÓMENOS DE LA LUZ EN LA SUPERFICIE DEL GLOBO TERRÁQUEO

Quien deseara hacer la descripcion detallada de los fenómenos que las solas variaciones de la luz del dia producen en la superficie de nuestro planeta, en la atmósfera y en el suelo, en las cumbres de las montañas lo propio que al nivel de las mesetas y llanuras, tanto en las ardientes regiones de la zona tórrida como en los risueños paisajes de la zona templada, no aventuraria nada tomando de los poetas y pintores las descripciones de sus cuadros; pediria á los primeros el auxilio de su maravilloso lenguaje; los segundos le proporcionarian los colores de su rica paleta y el prestigio de una reproduccion fiel.

Como no disponemos de ninguno de estos recursos, tan sólo podemos hacer aquí un rápido bosquejo de los principales fenómenos luminosos que ocurren en la atmósfera. Los unos, periódicos y regulares, dependen de los movimientos mismos de la Tierra; pero á menudo presentan, segun las estaciones y los climas, tales variaciones y contrastes que su reproduccion es siempre motivo para el observador de nuevas sensaciones, desterrando así la variedad toda causa de monotonía. Los otros no sobrevienen sino en circunstancias particulares, y entónces lo raro de sus manifestaciones se une á su propia belleza para excitar el interés de cuantos los presencian. Todos son para el artista, para el poeta y para el hombre de ciencia una mina inagotable, por decirlo así, de asuntos de estudio y de investigaciones para unos, de motivos de paisajes ó de temas de contemplacion para otros.

Los fenómenos más sencillos, frecuentes y familiares de esta clase son el dia, la noche, las auroras y los crepúsculos. Sin embargo ¡qué prodigiosa variedad no produce su sucesion, por lo que respecta al brillo de la luz, á los tonos, á los colores y matices, en el aire y en las nubes, en la superficie del suelo y en las aguas! Segun la hora del dia, la época del año ó el estado del tiempo, cambia la fisonomía del paisaje, adquiere los aspectos más diversos, siendo ora alegre, sonriente, matizada de suavísimas tintas, ora sombría, triste, monótona ó llena de contrastes violentos, ó finalmente, deslumbradora, armoniosa y vivamente coloreada.

Si pasamos desde la zona templada, en que estos cambios y trasformaciones son más aparentes y rápidos, á las comarcas inmediatas á los polos, ó si por el contrario, nos acercamos á las regiones del ecuador y de los trópicos, notamos que dichas variaciones no son tantas, que la sucesion de los fenómenos es más lenta; pero tambien el contraste se acentúa y acaba por llegar á su maximum. Por una parte, cuanto más avanzamos á cualquiera de los polos, más se van alargando los dias y las noches hasta ser unos y otras de medio año; por espacio de meses enteros deja el sol de aparecer en el horizonte, no habiendo más luz que la de la luna y la de las estrellas cuando no cubren el cielo espesas brumas, ó tambien las del crepúsculo y de las auroras polares. A tan prolongadas tinieblas sigue un dia no ménos largo, durante el cual un sol pálido y sin brillo describe sobre el horizonte sus lentas espirales.

Entre los trópicos sucede lo contrario: allí el dia y la noche se suceden á intervalos apénas desiguales durante todo el año; allí se ve

un cielo deslumbrador iluminado por un sol que sube todos los dias hasta el zenit; allí no hay crepúsculos ni auroras, sino hermosas noches en las que resplandece el fulgor de las estrellas y el de la Vía láctea: tal es, desde el punto de vista de la luz, el cuadro de los fenómenos que presentan las regiones intertropicales.

Oigamos lo que nos dice un sabio viajero, Cárlos Martins, y reproduzcamos algunos párrafos en que ha descrito los paisajes de una y otra zona, como testigo ocular. La interesante obra de la que entresacamos nuestras citas, expresa perfectamente con su título, *Del Spitzberg al Sahara*, el contraste que deseamos hacer resaltar.

Hé aquí en primer lugar la descripcion de un paisaje polar en el Spitzberg:

«El tiempo, dice, es allí de notable inconstancia: á una calma chicha suceden violentas rachas de viento. El cielo, sereno por espacio de algunas horas, se nubla de pronto; las brumas son casi permanentes y tan espesas que con dificultad se distinguen los objetos á pocos pasos de distancia; estas brumas, húmedas, frias, penetrantes, mojan como la lluvia. Las tempestades son desconocidas en aquellos sitios; el fragor del trueno no perturba jamás, ni áun en verano, el silencio de aquellos mares desiertos. Al acercarse el otoño, las nieblas aumentan, la lluvia se convierte en nieve, y remontándose el sol cada vez ménos sobre el horizonte, su claridad continúa debilitándose. El 23 de agosto, dicho astro se pone por primera vez en el Norte; esta primera noche no es más que un crepúsculo prolongado, mas á partir de aquel momento, la duracion de los dias disminuye rápidamente. Por último, el 26 de octubre, el sol se oculta en el mar para no volver á aparecer. Por espacio de algun tiempo, el reflejo de una aurora que ya no es precursora del dia ilumina el cielo hácia el mediodía, pero este crepúsculo va acortándose y palideciendo, hasta que se extingue por completo. La luna es entónces el único astro que alumbra la tierra; su luz descolorida, reflejada por las nieves, revela la sombría tristeza de esa tierra sepultada entre los hielos y de ese mar velado por brumas congeladas.

»Pero otras claridades reemplazan á la de la luna: las de las auroras boreales, que, intensas ó débiles, se ostentan todas las noches á los ojos del observador atento... Desde mediados de enero, el crepúsculo del medio dia se hace más perceptible, la aurora anuncia la vuelta del sol, crece y sube hácia el zenit. Por fin, el 16 de febrero, brilla por un instante un segmento del disco solar, como un punto luminoso, mas para extinguirse en seguida; conforme trascurren los dias, este segmento se agranda, hasta que el orbe entero se eleva por cima del mar, anunciando el fin de la prolongada noche de invierno. Por espacio de sesenta y cinco dias, ó sea hasta el 21 de abril, sigue habiendo alternativas de dia y de noche, empezando entónces un dia de cuatro meses, durante los cuales el sol da vueltas alrededor del horizonte, pero sin desaparecer jamás bajo él.»

Desde el Spitzberg, que dista solamente doce grados del polo, pasemos ahora al Sahara, cuyos límites meridionales están tambien á doce grados del ecuador. El contraste no puede ser más marcado. «Diariamente, dice Martins, presenciábamos espectáculos maravillosos. Tan pronto era la inmensidad de una meseta sin límites, anchurosos valles, grandes lagos, médanos de variadas formas, como fértiles oasis rodeados de pueblecillos ceñidos á su vez de fortificaciones pintorescas. La vista de las lejanas montañas añadia un encanto inexplicable á estos paisajes. El espectáculo del cielo no era ménos interesante que el de la tierra. En el mar y en todos los países llanos en que la cúpula celeste cobija una superficie lisa, sin relieve ni accidentes, el hombre dirige al cielo sus miradas; la vista de las nubes, del sol, de la aurora, del crepúsculo y de las estrellas reemplaza el aspecto lejano de la tierra, de los rios, de los lagos, colinas y montañas. Cada puesta del sol era una fiesta para nuestros ojos, un asombro para nuestra inteligencia, sobre todo cuando la atmósfera no estaba completamente serena. Las coloraciones son entónces más vivas y variadas. A medida que el astro solar se acerca al horizonte, las nubes cenicientas y desmelenadas de la bóveda del cielo, últimos emisarios de las brumas del norte, se orlan de tintas purpúreas cada vez más intensas, al paso que los contornos redondeados de las nubes blancas posadas en las lejanas

cumbres se circundan de una deslumbradora franja amarilla, y parecen engarzadas en el oro extendido por todo el ocaso. Tan luégo como el sol traspone el horizonte, se difunde por todo el cielo occidental una suavísima tinta sonrosada, que cual emanacion del astro desaparecido, colora todas las montañas. Una de estas, visible desde Biskra, lleva el nombre de *Djebel-Hammar-Kreddu* (la montaña de mejillas sonrosadas), y por cierto que merece tal nombre, porque mucho tiempo despues de ponerse el sol conserva un reflejo sonrosado como el carmin de las mejillas de una doncella. Por un efecto de contraste con el encarnado, el azul del cielo adquiere un tono verde-mar. El color sonrosado palidece poco á poco, el arco iluminado se va estrechando, pero la luz que lo alumbra es blanca y pura como la que debe brillar en el éter más allá de los límites de nuestra atmósfera. Gracias á la trasparencia del aire, se ven todos los contornos de los objetos terrestres claramente definidos. Los finos rebordes de las palmas aparecen más visibles que en pleno dia, y cuando el árbol entero se destaca sobre esos fondos alternativamente amarillos, encarnados y blancos, parece que la poesía de ese gallardo vegetal se revela á nuestra vista por vez primera. En tanto, se acerca la noche, apareciendo primeramente los planetas y luégo las grandes constelaciones, hasta que el cielo se tachona de millones de estrellas y su bóveda se aclara progresivamente; la Vía láctea, zona blanquecina y confusa en las altas latitudes, parece aquí una banda cuajada de deslumbradores diamantes que salpican la cúpula celeste. La luna no es ya ese astro de fulgor mortecino cuya mirada melancólica parece compadecerse de la tristeza de nuestros brumosos países, sino un disco que lanza brillantes y purísimos destellos plateados y que refleja los rayos que recibe sin amortiguarlos, ó bien un creciente completado por la luz cenicienta que marca visiblemente los contornos de su orbe entero.»

Añadamos para terminar las siguientes líneas en que el mismo autor describe el aspecto del cielo de Egipto al rayar el dia. «Cuando llegamos á la vista del Cairo, todavía no habia salido el sol; iba ascendiendo por el cielo un matutino albor de color de ópalo; el aire tenia una trasparencia y limpidez extraordinarias, y las copas de las palmeras parecian rodeadas de una clarísima aureola. Entónces comprendí lo que los viajeros han descrito acerca de las maravillas de la luz en las Indias orientales, y en efecto, no hay nada que pueda compararse con los encantos de esa maga que tantos atractivos comunica al desierto, y cuya ausencia decolora y entristece los paisajes más bellos.»

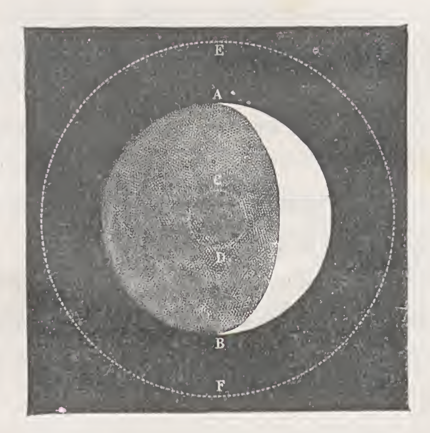


*Fig.* 1.—Luz cenicienta de la Luna.

Es indudable que los fenómenos de la luz no tienen en los países de la zona templada la intensidad de los que tan expresiva fisonomía prestan á los países de las zonas extremas. En cambio ofrecen la ventaja que reunen los caractéres opuestos; nuestros inviernos más largos y rigurosos nos dan una idea de las sensaciones que debe producir la contemplacion de las regiones glaciales próximas al polo, y á veces nuestros veranos son bastante hermosos para hacernos comprender el esplendor del cielo tropical.

Los fenómenos ópticos naturales de que acabamos de ocuparnos sucintamente, son de los que se reproducen cada dia, cada estacion, cada año. Aun cuando son muy variados, tienen todos ellos su explicacion en los simples cambios que el doble movimiento de rotacion y de traslacion de la Tierra produce en la atmósfera y en el modo cómo está iluminada. Segun que el sol esté más ó ménos elevado sobre el horizonte, que las capas gaseosas que nos rodean sean más ó ménos secas y húmedas y por consiguiente de mayor ó menor trasparencia, los rayos luminosos que penetran en estas capas se rompen, se dispersan, se absor-

ben en proporciones que varían hasta lo infinito, resultando esas mil tintas, esas coloraciones que adquieren todos los grados de intensidad, todos los matices del prisma, desde el azul oscuro, límpido y profundo del cielo de los trópicos, hasta el gris sombrío y mate de los países brumosos, pasando por los tonos finos, claros y armoniosos de nuestras zonas templadas. En todos estos fenómenos de óptica hay tantas complicaciones de las condiciones atmosféricas, variables de continuo, que á la ciencia le costaria trabajo explicarlas detalladamente: basta que se halle en disposicion de reducirlas á un corto número de casos sencillos, y de enlazar la explicacion de estos casos con la de los que el físico analiza en su laboratorio.

Hay otros fenómenos de óptica atmosférica sujetos á leyes más singulares, pero ofreciendo el mismo interés bajo el punto de vista de la belleza del aspecto que presentan á los ojos del espectador. Estos fenómenos son los arcoíris solares y lunares, los halos, parhelias, paraselenes, y esos efectos de espejismo que en un principio se creyeron exclusivamente propios de los desiertos arenosos de la zona tórrida, y que se observan con frecuencia en los climas más opuestos. Todos estos meteoros luminosos se explican fácilmente en virtud de las leyes conocidas de la marcha de la luz por los diferentes medios trasparentes, y sus colores en virtud de la descomposicion ó dispersion que son consecuencias de dicha marcha. Cuando llegue el momento de formular su teoría, los describiremos más ampliamente.

Por lo que respecta á las auroras polares, boreales ó australes, son fenómenos luminosos cuyo orígen se relaciona con el estado eléctrico ó magnético del globo terráqueo y de los cuales jamás darán exacta cuenta las solas leyes de la óptica. Tambien nos ocuparemos de ellas en su lugar correspondiente.

## II

### FENÓMENOS DE LA LUZ EN LOS PLANETAS Y EN LA LUNA

Tal es en su conjunto el cuadro de los principales fenómenos mediante los cuales se hace ostensible en la superficie de la Tierra el agente óptico cuyas leyes vamos á estudiar. Estas leyes son universales y, segun veremos, tambien son aplicables á otros mundos; pero no sabemos si en estos mundos, en los planetas por ejemplo, que tantas analogías astronómicas y físicas ofrecen con la Tierra, la luz del Sol produce los mismos fenómenos ópticos. Es más que probable que en la superficie de esos cuerpos, á lo ménos en la de los que están dotados de su correspondiente atmósfera, las mismas causas produzcan idénticos efectos; pero las condiciones físicas y químicas, por ejemplo, la composicion de su envolvente gaseosa, la existencia de tal ó cual sustancia, la carencia ó presencia del vapor de agua, etc., pueden ser tan diferentes, que no es posible decir si el aspecto del cielo de los planetas es ó no semejante al de nuestro cielo terrestre.

Lo que se puede calcular son los valores relativos de las cantidades de luz que el Sol envia á la superficie de cada globo planetario, y tambien la intensidad de la luz recibida, la cual depende solamente de las distancias de los planetas al Sol (1). Por ejemplo, en Mercurio esta intensidad es siete veces mayor que en la Tierra, al paso que en Neptuno sólo es la milésima parte. Pero aquí se trata de la luz recibida en el límite exterior de la atmósfera de cada planeta; para saber lo que acerca de este punto sucede en la superficie misma del suelo, seria preciso conocer la absorcion de cada atmósfera. Por lo que hace á las alternativas que producen el dia y la noche, y que resultan de la rotacion de cada globo sobre su eje, se suceden casi del propio modo en los cuatro planetas medios, Neptuno, Vénus, la Tierra y Marte; sus períodos son más cortos en Júpiter y Saturno, en los que el sol apénas permanece cinco horas sobre el horizonte; pero las largas estaciones joviales ó saturninas compensan la brevedad de los dias y de las noches.

Marte es probablemente el planeta que se parece más al nuestro por su constitucion física.

El telescopio permite ver en él detalles que presentan su superficie dividida en espacios brillantes, los cuales reflejan vivamente la luz

---

(1) Esta intensidad varía en razon inversa de los cuadrados de las distancias. Más adelante veremos que el brillo intrínseco de un foco como el del Sol subsiste siempre miéntras su disco conserve dimensiones aparentes perceptibles. La cantidad de luz que el Sol envia es pues proporcional á la superficie de su disco, tal cual se le ve desde la superficie de cada planeta, superficie que varía á su vez, de un planeta á otro, en razon inversa de los cuadrados de sus distancias respectivas.

solar, y en espacios oscuros que la absorben: probablemente son los continentes y los mares. En los polos tiene manchas de un blanco más vivo que se extienden ó reducen en latitud, segun que la época corresponde á la estacion invernal de Marte ó á la de verano. Dedúcese de aquí con bastante verosimilitud que las manchas blancas y variables de las zonas polares son efecto de la acumulacion de nieves y hielos. Finalmente, se ha podido observar otras manchas movibles y agrisadas que deben ser nubes flotantes en la atmósfera. Así pues, todo hace presumir que la constitucion física de dicho planeta se asemeja mucho á la de la Tierra, y las personas de fértil imaginacion llegan hasta pintar los paisajes del interesante astro. Pero los fenómenos de la luz ¿no serán allí distintos de los que observamos en la Tierra? El color rojizo de los continentes que hace parecer de un gris verdoso el de los espacios que se tienen por mares, ¿no es indicio de una constitucion especial en la envolvente gaseosa de Marte, y de propiedades puramente particulares por lo que respecta á los fenómenos luminosos que ocurren en dicha envolvente? Pueden hacerse toda clase de conjeturas sobre este asunto, y nos parece imposible que se prejuzgue el aspecto del cielo de Marte por comparacion con el que se ve desde la Tierra.

Quizá sea esto más fácil por lo que se refiere á la Luna. Tal vez se pueda asegurar que ese aspecto presenta en nuestro satélite un marcado contraste, del que es fácil formarse una idea, con el aspecto de los paisajes terrestres. La Luna carece de atmósfera, si no completa, al ménos totalmente. Tampoco hay en su superficie agua ni líquido alguno evaporable; por lo cual tienen los paisajes lunares una crudeza de tonos que no se ve en otra parte, en ninguna zona de la Tierra, y que aparece claramente definida en todas las observaciones telescópicas, cualquiera que sea el poder óptico de los instrumentos. Como la Luna carece de ese velo luminoso que nos oculta las estrellas durante el dia, hasta cuando el cielo está más sereno y despejado, el cielo de los dias no se distingue allí del de las noches sino por la presencia del Sol, cuyo globo sin rayos, sin aureola, se destaca sobre un fondo absolutamente negro. Allí brillan siempre las estrellas, con un fulgor que debe permitir columbrar hasta las más pequeñas, y la Vía Láctea reluce con una limpieza, con un esplendor que no conocemos en la Tierra.



*Fig.* 2.—Cráteres lunares.

Por lo que hace al suelo lunar, á las raras y marcadas asperezas y escabrosidades de que está sembrado, y á los millares de cavidades que en él se divisan, el resplandor y la crudeza

de su luz cegarian al que pudiera observarlos de cerca; y apénas si los reflejos de las partes que reciben la luz del Sol aminoran las sombras negras de las que no están alumbradas por él. En un paisaje lunar no hay perspectiva aérea, y por consiguiente, tampoco esas transiciones, esos matices, esas gradaciones vaporosas, ni esas variaciones de colores que tanto atractivo prestan á los paisajes terrestres, áun en los climas más desolados de nuestro globo. La larga duracion de los dias y de las noches (por término medio veintinueve veces y media mayor que la de la Tierra) debe aumentar la monotonía del aspecto de esa Tierra ruinosa.

## III

### LAS PERCEPCIONES EXTERNAS, LA LUZ Y EL SENTIDO DE LA VISTA.

De cuantos agentes físicos impresionan nuestros sentidos y que, por su mediacion, nos ponen en comunicacion con el mundo exterior, no hay ninguno que tenga tanta importancia como la luz.

Sin la luz, ó lo que es igual, sin el órgano de la vista, seria forzosamente muy limitado el conocimiento que tendríamos de los cuerpos ó de los séres que componen el universo. Por el tacto solo, de cuyo sentido vienen en cierto modo á ser modificaciones ó variedades el olfato y el gusto, no estaríamos en relacion sino con los objetos á los cuales podemos acercarnos hasta tocarlos. Verdad es que merced al oído podríamos percibir los movimientos íntimos de cuerpos extraños situados á alguna distancia, pero esta sensacion sola nos serviria cuando más para juzgar de la direccion en que se hallan estos cuerpos, y áun así y todo no podríamos traspasar los límites, relativamente muy circunscritos, de la Tierra y su atmósfera.

Privados de la luz ó del sentido de la vista, ¿qué sabríamos de la forma, dimensiones, distancia y posicion relativa de los cuerpos situados en dichos límites? ¿Qué idea podríamos formarnos de esas propiedades variadas por las cuales se diferencian entre sí, de su órden, de sus movimientos? Casi todo el inmenso terreno de las ciencias físicas y naturales estaria vedado para nosotros. Ni siquiera podemos imaginar la extraordinaria pequeñez del círculo al cual se limitarian nuestros conocimientos, observando lo que les pasa á los ciegos de nacimiento; porque si bien es verdad que estos no conocen por sí mismos lo que es la luz y el color, en cambio, gracias á la educacion, al lenguaje, al auxilio de las personas que ven y con las cuales viven, pueden adquirir y en realidad adquieren una porcion de nociones de que su falta de vista les hubiera privado para siempre, si hubiesen estado solos.

Hay que confesar por otra parte que la vista sola, sin el socorro y exámen de los otros sentidos, nos proporcionaria nociones muy vagas del mundo exterior; pero gracias á la educacion práctica que resulta de su concurso, adquirimos sucesivamente la idea de la existencia real de nuestro propio cuerpo, y luégo la de los cuerpos extraños, de su forma, dimensiones y distancias. Juzgamos de su relieve por el claro-oscuro de su superficie, y la innumerable variedad de colores que esta superficie presenta nos ayuda á distinguirlos unos de otros y á recordar sus propiedades especiales.

Finalmente, la luz y el sentido de la vista son los que nos permiten conocer su estado de reposo y de movimiento; y como la mayor parte de los fenómenos cuyas leyes estudian las ciencias naturales y físicas consisten en movimientos, ya del conjunto de los cuerpos ó bien de sus partes, llegamos á averiguar cuáles son esas leyes observando la direccion, velocidades y períodos de dichos movimientos.

La simple vista basta para proporcionarnos esos medios preciosos de investigacion científica; pero ¡cuánto más eficaces son cuando podemos añadirles el recurso de los instrumentos de óptica, basados precisamente en el conocimiento de las leyes de los fenómenos luminosos! Valiéndonos de estos instrumentos, podemos multiplicar en proporcion enorme la potencia de nuestro órgano visual. Gracias al telescopio, se ha ampliado indefinidamente el campo de la astronomía, limitada en un principio á los astros visibles á la simple vista, y en el dominio del espacio infinito hemos conquistado regiones desconocidas del universo, pobladas de mundos innumerables relegados á distancias aterradoras. Concentrada en el foco de nuestros poderosos instrumentos, la débil luz radiada por esos astros, que se perdia por

decirlo así ántes de llegar á impresionar nuestra retina, y hoy multiplicada por la superficie de los objetivos telescópicos, nos ha demostrado la existencia de cuerpos que la mente más osada apénas podia concebir. Del propio modo y gracias tambien al microscopio, ha aparecido ante nuestra asombrada vista el mundo de los infinitamente pequeños, y hemos podido penetrar el secreto de la constitucion íntima de séres cuya existencia ni siquiera sospechábamos ántes.

En todo lo que precede, no consideramos la luz sino con relacion á su importancia intelectual ó científica. Si de aquí pasáramos á ocuparnos del cometido que desempeña en la economía de la naturaleza, en la influencia que ejerce en nuestra existencia misma, en la de los séres organizados ó vivientes, veríamos que este agente físico no tan sólo es útil, sino tambien indispensable, condicion necesaria de la vida, por lo ménos en la superficie del globo que habitamos. Y en efecto, sin la luz los vegetales no podrian desarrollarse, y por consiguiente no podria existir la vida animal, íntimamente ligada á la existencia de los vegetales mismos. En un capítulo especial estudiaremos la accion de la luz sobre los séres organizados, y esta verdad, de la que nos limitaremos á hacer ligerísima mencion aquí, aparecerá entónces con toda su importancia. Por último, si dejásemos de percibir la luz, áun cuando esta continuara ejerciendo en la naturaleza su benéfica influencia, si el hombre estuviera privado del sentido de la vista, ¿quién no comprende que su existencia estaria, si no absolutamente amenazada, por lo ménos muy comprometida? No seria la ciencia únicamente la que entónces sufriria notable menoscabo, sino tambien todo cuanto constituye nuestra superioridad sobre los demás animales. Por lo demás, ¿qué supondria la luz para nosotros si careciésemos del órgano mediante el cual percibimos sus variadas manifestaciones?

La luz es para el hombre, lo propio que el sonido, un fenómeno á la vez exterior é interior.

Todo foco luminoso—el Sol, por ejemplo,—lo es tambien de un movimiento vibratorio que conmueve el éter en todos sentidos, propagándose luégo con extraordinaria rapidez en forma de ondulaciones de diferentes amplitudes y períodos. Este movimiento atraviesa ciertos medios, tropieza con los cuerpos, se refleja parcialmente en ellos, queda absorbido tambien en parte, se rompe y se fracciona de diversos modos produciendo los más variados efectos; aquí, elevacion de temperatura; allí, combinaciones y descomposiciones químicas, etc. Todo esto es el lado exterior del fenómeno, la forma bajo la cual existe, abstraccion hecha del hombre ó de cualquier otro sér capaz de experimentar la sensacion de la luz. Ahora bien, si en el trayecto de estas radiaciones se encuentra el órgano visual del hombre ó de cualquier otro sér viviente, al punto se comunica la conmocion por la retina á los nervios ópticos, excitando en ellos la sensacion de la luz con todas sus modificaciones de brillo y de colores. Tal es el fenómeno interior que depende de nuestra organizacion, de nuestra sensibilidad, y así lo prueba el que de las radiaciones emanadas de un foco, tan sólo las que tienen cierta rapidez en sus períodos producen la sensacion luminosa. Las ondas ménos rápidas y más largas dan orígen á fenómenos caloríficos, sin que haya luz, sucediendo lo propio con las más rápidas y cortas, cuya accion se manifiesta únicamente en forma de fenómenos químicos.

Consideradas en sí mismas las ondas caloríficas, las luminosas y las químicas, no difieren sin embargo de naturaleza; unas y otras son movimientos vibratorios emanados de las mismas fuentes y producidos por la propia causa; su duracion, la rapidez con que se suceden son los únicos elementos que establecen entre ellas alguna diferencia. Todas se confunden en el seno del éter, del medio eminentemente elástico en que se propagan, y solamente parecen como separadas al tropezar con cuerpos, ya sean inorgánicos ó inertes, ya organizados ó vivientes, minerales, vegetales ó animales, sólidos, líquidos ó gases, ó al penetrar en sus sustancias. Entónces es cuando se trasforman esos movimientos vibratorios, y cuando los unos se manifiestan como calor, los otros como actividad química y los otros en forma de luz.

Vese pues, por esta primera exposicion, que la sensacion de la luz y de los colores no es otra cosa sino esa propiedad particular que tienen los nervios ópticos de ser impresionados por radiaciones de cierta intensidad, emanados de

lo que se llama una fuente ó foco luminoso. Es una propiedad puramente peculiar del hombre, y, en cierto grado que ignoramos, de los animales. Tambien es posible que ciertos séres vivientes perciban como luz ondas que son para nosotros exclusivamente caloríficas, ú otras ondas que nos producen un efecto exclusivamente químico.

## IV

### LOS MANANTIALES DE LUZ Y LOS MEDIOS ÓPTICOS

Para que percibamos la sensacion de la luz se requieren dos condiciones; la primera que, á una distancia que puede variar hasta lo infinito, haya un *manantial luminoso*, es decir un cuerpo cuyo estado físico ó químico sea tal que de sus moléculas partan vibraciones especiales capaces de agitar progresivamente el éter hasta llegar á nuestra retina, en la cual el fenómeno, de exterior que era en un principio, se convierte en interior. La segunda condicion consiste en que el medio que separa del ojo el manantial luminoso sea á propósito para trasmitir las ondas de luz emanadas de éste.

Entremos en algunos detalles preliminares acerca de ambos puntos.

Los manantiales luminosos *propiamente dichos* ó *directos* son los cuerpos en que nace el movimiento luminoso. Por lo regular, la elevada temperatura á que están sometidos es la que produce su incandescencia: más adelante veremos que á los 500 ó 600 grados los cuerpos se vuelven luminosos ó visibles en la oscuridad. Tambien produce á menudo la incandescencia un fenómeno químico, la combustion, y en especial la de los gases. Pero en ciertos casos puede haber luz sin que se desarrolle calor perceptible, como sucede con los cuerpos fosforescentes.

Un cuerpo que no es luminoso por sí mismo, pero que recibe en su superficie la luz de un foco, se torna visible al alumbrarlo éste, de suerte que á su vez se convierte en manantial de luz, siendo entónces foco ó manantial *indirecto* ó *secundario*. Al paso que el Sol y las estrellas son focos luminosos propiamente dichos, la Luna y los planetas lo son secundarios, puesto que no hacen sino enviar al espacio parte de la luz que reciben del Sol. Cuando la Luna es visible, entre el cuarto menguante y el novilunio, en forma de creciente, más ó ménos delgado, se ve distintamente al lado del menisco luminoso, todo el resto del disco, dándose el nombre de luz cenicienta al resplandor de aspecto fosforescente de que hablamos. Este resplandor procede de la parte iluminada de la Tierra que desempeña en las noches de nuestro satélite el papel que éste último desempeña en las noches terrestres; es una *tierra llena* análoga en todo á nuestro plenilunio. Así pues, la luz cenicienta es la luz solar doblemente reflejada de la Tierra á la Luna y de ésta á aquélla. A cada paso podemos observar fenómenos semejantes: cualquier objeto alumbrado por un foco directo alumbra á su vez los objetos inmediatos que á su vez reflejan esta luz convirtiéndose aunque en grado cada vez más débil, en focos luminosos.

Tambien se podrian dividir los manantiales de luz en naturales y artificiales, subdividiéndose además los primeros en permanentes y transitorios ó accidentales. El Sol es para nuestro mundo un manantial luminoso permanente; los bólidos, las estrellas fugaces, las auroras boreales son focos naturales accidentales. Por lo que atañe á las fuentes artificiales de luz, comprenden todas las que producimos en la superficie de la Tierra valiéndonos de medios industriales.

Hablemos ahora de la segunda condicion necesaria para la percepcion de la luz, de los medios ópticos.

Consideremos un foco de luz, primitivo ó secundario, por ejemplo, la llama de una bujía. Entre esta llama y el ojo que experimenta la sensacion luminosa media cierta distancia, y por lo tanto un medio ó una serie de medios á propósito para dar paso á la luz emanada del foco. El ojo mismo está constituido por medios de este género, que estudiaremos en el capítulo consagrado á la vision.

Esta propiedad de dar paso á la luz, desde un foco al ojo, ha hecho dar á los medios de que hablamos el nombre de *trasparentes*, y tambien el de *traslúcidos*, cuyo último calificativo indica un grado menor de la propiedad de que se trata.

Por el contrario, la interposicion de otros

cuerpos ó medios entre el ojo y el foco puede ser un obstáculo para la percepcion de la luz: tales son los cuerpos ó medios *opacos*. Así sucederá con la bujía en cuestion si desde la habitacion en que estamos y en la que es visible para nosotros porque entre ella y nuestros ojos no hay más medio que el aire, la trasladamos á una estancia contigua, ó la tapamos con una pantalla. En uno ú otro caso se torna completamente invisible: las paredes del cuarto, la pantalla de carton ó madera, constituyen el medio opaco que intercepta la luz, ó que no es propio para su trasmision.

Por consiguiente, no todos los medios son adecuados para la trasmision de la luz, siendo menester para percibirla que haya cuerpos trasparentes, traslúcidos. Pero cuando media esta condicion, cuando aparece un foco luminoso, la impresion de la luz es instantánea como sólo esté separado del ojo por un medio traslúcido ó trasparente. A lo ménos, así nos lo parece en las observaciones ó experimentos que podemos hacer espontáneamente en la superficie de la Tierra. Así tambien, si la luz llega á desaparecer, no podemos determinar ningun intervalo de tiempo apreciable entre el instante de su desaparicion efectiva y aquel en que cesa la sensacion luminosa. Sin embargo, por una parte se prueba en realidad, y más adelante veremos cómo, que la sensacion luminosa no desaparece instantáneamente, lo cual depende de cierta duracion de la impresion en la retina, y por otra parte, que la luz se propaga sucesivamente en el espacio, es decir, invierte un tiempo que puede medirse en recorrer la distancia comprendida entre el ojo y el foco. Al decir que la luz se propaga, nos valemos pues de una expresion conforme con la realidad de las cosas. Pero prescindiremos desde luégo de la duracion de esta propagacion, la cual es tan rápida que puede considerársela como si estuviera dotada de una velocidad infinita en la mayor parte de los experimentos de que se valen los físicos para el estudio de la propagacion de la luz.

Digamos algunas palabras sobre los medios considerados con relacion á la propagacion de la luz. Los hemos dividido en medios trasparentes ó traslúcidos y en medios opacos.

La trasparencia y la opacidad no son jamás absolutas.

Para que un cuerpo pueda pertenecer á la primera clase, no tan sólo se requiere que dé paso á la luz, sino que al través de él se vean con cierta limpieza los objetos luminosos ó alumbrados. Pero si la forma y los contornos de estos objetos dejan de ser perceptibles sin que la luz se extinga completamente, el medio ó el cuerpo es simplemente *traslúcido*.

El medio dotado de la mayor trasparencia que conocemos es el *vacío;* y al decir el *vacío*, entendemos con todos los físicos, no el vacío absoluto, que es puramente una hipótesis, sino un espacio tan completamente privado de materia ponderable como sea posible. Tal es, en un grado puramente relativo, el vacío obtenido con la máquina neumática, el de la cámara barométrica, y más aún, el espacio interplanetario ó intersidéreo. La luz que recibimos del Sol, de las estrellas, de las nébulas, prueba suficientemente que no necesita, como el sonido, de un medio ponderable para propagarse por más que ántes de llegar á nuestros ojos haya tenido que atravesar en último término el espesor de nuestra atmósfera. La trasparencia del aire, aunque evidente, es infinitamente menor que la del éter, y cualquiera puede comprobar la disminucion de brillo de los objetos luminosos conforme va creciendo el espesor de las capas atmosféricas (1).

Por lo demás, tampoco parece ser absoluta la trasparencia del aire. Basándose algunos astrónomos en la distribucion de las estrellas de diferentes magnitudes y en el poder de penetracion de los telescopios, han creido poder calcular la extincion que sufre la luz al propagarse por el espacio etéreo. W. Struve admite en sus *Estudios de astronomía estelar* «que la intensidad de la luz decrece en mayor proporcion que la razon inversa de los cuadrados de las distancias; lo que equivale á decir que hay una pérdida de luz, una extincion en el paso de esta por el espacio celeste.» Calcula dicha extincion en un centésimo próximamente de la intensidad por el trayecto de la luz al través de una distancia igual á la de las estrellas de primera magnitud.

(1) Es posible, mejor dicho es probable, que la absorcion de la luz, que tan rápidamente crece cerca del horizonte, no dependa solamente del aumento de espesor y densidad de las capas del aire, sino tambien de los corpúsculos en suspension, de moléculas acuosas, polvillos, etc., mucho más numerosos cerca del suelo que á cierta altura en la atmósfera.

La trasparencia no es propiedad exclusiva del vacío de los espacios celestes, del aire y de los gases, pues la poseen tambien los líquidos y los sólidos, como el agua, el cristal y muchas sustancias cristalizadas. Al través del espesor de un cristal, de una tenue capa de agua se ven los objetos con gran limpieza; pero esta trasparencia disminuye con rapidez á medida que el espesor aumenta; de incoloro que parece al principio el medio interpuesto entre la vista y los objetos, adquiere un color cada vez más oscuro, hasta que, siendo ya total la absorcion de la luz, se acaba por no ver otra cosa sino el medio mismo. Así por ejemplo, un disco blanco, sumergido en el mar enfrente de la costa de Civitavecchia, estando el agua perfectamente clara, desaparecia del todo á los 45 metros de profundidad cuando más (experimento de Cialdi). «El color del disco se volvia desde luégo ligeramente verdoso, despues tiraba al azul claro, matiz que se oscurecia conforme se iba bajando el aparato, hasta que adquiriendo un color casi tan sombrío como el del agua, no fué ya posible distinguirlo del medio circundante.» Otros discos pintados de amarillo y de color de cieno marino, desaparecian en iguales circunstancias á 17 y 24 metros de profundidad.

La trasparencia de los gases y del aire atmosférico cuando está bien puro, es mucho mayor. Desde una cumbre muy elevada, como la del monte Blanco, la vista se recrea en un inmenso panorama, y distingue los objetos á distancia considerable. Segun M. Martins, la porcion de la superficie de la Tierra geométricamente visible desde lo alto del monte Blanco es de 210 kilómetros; por consiguiente, si la trasparencia del aire fuera absoluta, se podria ver desde dicha cumbre el golfo de Génova; pero «más allá de 100 kilómetros, los objetos velados por la calima son confusos é indecisos. Hasta los 60 kilómetros todo es claro y discernible.» Es indudable que se podrian ver puntos luminosos durante la noche hasta el límite del círculo de visibilidad, y así debian opinar M. Martins y las personas que lo acompañaban, puesto que se habian propuesto cambiar señales con hogueras con la ciudad de Dijon, que es uno de los puntos de tan inmenso horizonte.

Además de los cuerpos trasparentes ó diáfanos, tenemos los simplemente *traslúcidos*, que dan paso á la luz sin que al través de ellos se distingan los objetos, como son el cristal raspado, el papel, el asta, el alabastro, y ciertos líquidos como la leche. Mojando el papel ó extendiendo sobre él una tenue capa de aceite, aumenta su traslucidez que llega á convertirse en trasparencia cuando el papel es bastante delgado. Los mineralogistas dan el nombre de *hidrofana* á una especie de ópalo (cuarzo resinita) que es blanco y casi opaco en su estado ordinario, pero que se vuelve traslúcido si se le tiene algun tiempo metido en agua.

Hasta los cuerpos que parecen opacos en absoluto dejan pasar cierta cantidad de luz cuando se los reduce á hojas de muy poco espesor. Las piedras, la madera, los metales y otras muchísimas sustancias son opacas; sin embargo, si se pone entre los ojos y la luz del dia una hoja de oro, por ejemplo,—los batidores de oro las hacen tan delgadas que hay que sobreponer 10,000 para formar un milímetro de espesor,— se distingue un hermoso color azul verdoso que atestigua la trasmision de la luz, no al través de las grietas producidas por el batido, sino al través de la sustancia misma del metal. Segun los experimentos de M. A. Dupasquier, las hojas delgadas de plata, de oro verde (aleacion de plata y oro), dan asimismo paso á una tenue luz, cuyo color es azulado, sucediendo lo propio con las hojas de cobre, siquiera sea ménos regular la coloracion azul oscura de la luz trasmitida al través de estas hojas, lo cual consiste sin duda en las desigualdades del espesor del metal.

Así pues, la trasparencia, la traslucidez y la opacidad son propiedades puramente relativas, y desde el éter interestelar que posee en el más alto grado la trasparencia, hasta los metales más opacos, sólo median diferencias de gradacion. La extraordinaria pequeñez de los objetos cuya estructura interna estudian los micrógrafos,—infusorios, microfitos,—es la que explica su trasparencia.

Por lo demás, aquí nos limitamos á enumerar los cuerpos que disfrutan en diferente grado de la propiedad de dar paso á la luz al través de su espesor. Más adelante veremos las explicaciones que se han propuesto para dar cuenta de esta propiedad, y cómo se la supone enlazada con la estructura molecular de los medios.

# CAPÍTULO II

## PROPAGACION RECTILINEA DE LA LUZ

### I

### PROPAGACION DE LA LUZ EN LOS MEDIOS HOMOGÉNEOS

Consideremos un manantial luminoso cualquiera, primitivo ó secundario. Supongamos que entre los diversos puntos de este manantial, situado á una distancia indeterminada de la vista, hay un medio perfectamente trasparente y homogéneo. El observador verá con igual limpieza todos los puntos de dicho foco.

Ahora, supongamos que en la línea recta que va desde el ojo á uno de esos puntos se pone una pantalla, es decir, un cuerpo opaco; y al instante se hará invisible el punto correspondiente del foco. Este caso práctico es, salvo las excepciones que más adelante expondremos, un caso general cuya ley se enuncia diciendo que la *luz se propaga en línea recta en los medios homogéneos*.

Quizá no haya existido jamás la perfecta homogeneidad, que esta ley supone. Se la considera tal en los espacios celestes, allá donde existe el vacío de materia ponderable, en una palabra, en el éter; pero es una hipótesis de imposible comprobacion. En la superficie de la Tierra, en los medios atmosféricos, la homogeneidad es muy limitada: exige que la densidad del aire sea en todas partes la misma, como sucede tal vez con las capas de aire inmediatas á la superficie del suelo, cuando la temperatura es ostensiblemente igual en todos sus puntos, y no se toma en consideracion más que una ligera zona horizontal de esas capas. Lo propio acontece tambien con respecto á una masa homogénea de cristal trasparente, de agua pura, etc., si el punto luminoso está situado en la superficie del medio y el observador en un punto de la superficie opuesta.

En estos casos sencillísimos, pero difíciles de realizar rigurosamente, se puede considerar como una *línea recta* la *trayectoria* seguida por la luz en el interior del medio homogéneo. Compruébase aproximadamente esta ley del modo siguiente:

Entre el objeto luminoso, la llama de una bujía por ejemplo, y el ojo, se interpone una serie de pantallas opacas, cada una de ellas con una pequeña abertura en medio. Si el punto luminoso, las aberturas de las pantallas y el ojo del observador están en línea recta, la luz es visible. Pero si entónces se cambia la colocacion de la bujía, de alguna de las pantallas ó del observador, éste dejará de ver la luz.

Se puede hacer la misma prueba en sentido inverso con hebras de seda ó alambres muy finos, situados paralelamente entre sí y en un mismo plano; todo punto luminoso puesto en la prolongacion de esta direccion quedará eclipsado ó invisible; pero si se le desvia á uno ú otro lado, la luz llegará al punto al ojo y será visible. Esto tiene aplicacion lo mismo á la luz emanada de un objeto no luminoso por sí propio que á la de un foco propiamente dicho. Por esta razon la luz del dia no se puede ver al través de un tubo largo y estrecho si este tubo no es rectilíneo, ó por lo ménos si su curvatura es tanta que no pueda atravesarla una línea recta sin tocar sus paredes.

Encerrémonos en una habitacion perfectamente cerrada y oscura, y no dejemos pasar la luz del sol sino por un agujerito practicado en el postigo del balcon. Al punto veremos un cono luminoso que marca en el aire el paso de la luz (fig. 3) y nos convenceremos de que los contornos de este cono son perfectamente rectilíneos. En este caso, no es el aire lo que vemos,

sino las partículas de polvo ó de humo que se hallan en suspension en él, y que al recibir la luz se hacen visibles sobre el fondo oscuro de la habitacion.

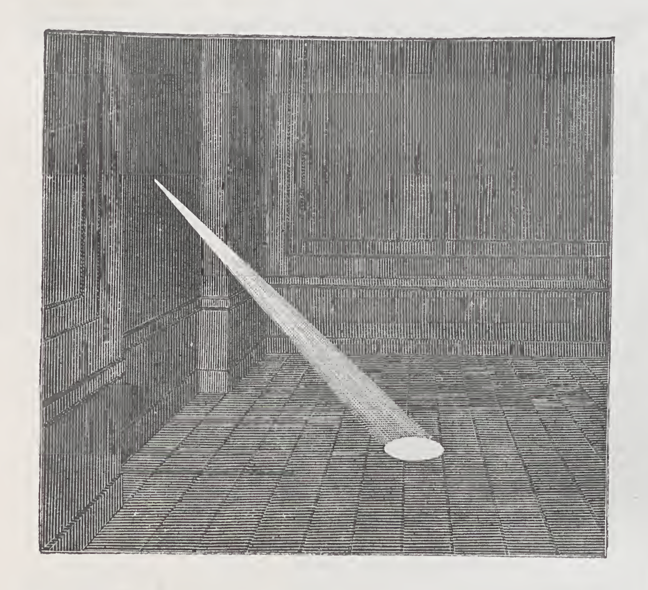


*Fig. 3.*— Propagacion de la luz en línea recta. Haz de rayos solares en la cámara oscura

Se puede comprobar tambien la propagacion de la luz en línea recta cuando el sol, oculto por un grupo de nubes, hace pasar sus rayos entre los intersticios de estas. Entónces se ven proyectarse en la atmósfera rastros más ó ménos luminosos (fig. 4) que presentan visiblemente una direccion rectilínea. Pero muy pronto veremos que, estando la atmósfera compuesta de capas de densidades variables, la luz que las atraviesa sucesivamente no lo hace ya en línea recta. Para que este movimiento sea rectilíneo en la superficie misma de la Tierra, se requiere que el medio trasparente sea perfectamente homogéneo, segun hemos dicho, ya lo forme el aire, un gas cualquiera, el agua, el cristal, etc.

Tenemos pues un primer principio, que se formula de este modo: *La luz se propaga en línea recta en un medio homogéneo.*

## II

### PRINCIPIO DE LA TEORIA DE LAS SOMBRAS.

En esta ley está basada la teoría geométrica de las sombras. Entremos en algunos detalles acerca de este asunto.

Consideremos uno ó muchos cuerpos opacos situados en un medio trasparente ú homogéneo, en presencia de un punto luminoso ó de un manantial de luz de reducidas dimensiones. Estos cuerpos estarán iluminados ó *alumbrados* en to-



*Fig. 4.*— Propagacion rectilínea de la luz. Los rayos solares en la atmósfera

dos los puntos de su superficie que pueden enlazarse con el foco por medio de líneas rectas no interrumpidas. Los otros puntos no reciben luz directamente: son invisibles, están en la oscuridad ó á la *sombra.* Si se traza mentalmente desde el foco un cono tangente á la superficie de cada uno de estos cuerpos, todos los puntos del espacio situados respectivamente detrás de ellos y en el interior del cono estarán privados asimismo de luz. Dase el nombre de *cono de sombra* al conjunto de la prolongacion oscura del cono de que hablamos y que se proyecta hasta lo infinito. Una pantalla opaca situada en el cono de sombra de modo que sobresalga de sus contornos, aparecerá oscurecida en toda la extension de la seccion, é iluminada en todos

sus demás puntos. La línea de separacion de la luz y de la *sombra proyectada* en la pantalla estará en este caso perfectamente limitada, como la que limita la parte alumbrada y la oscura del cuerpo opaco. Una simple consideracion geométrica, fácilmente comprobada por la experiencia, demuestra que las dimensiones de la sombra proyectada aumentan con la distancia á que se ponga la pantalla, y además que á igualdad de distancia serán tanto mayores cuanto más cerca del foco luminoso esté el cuerpo opaco.

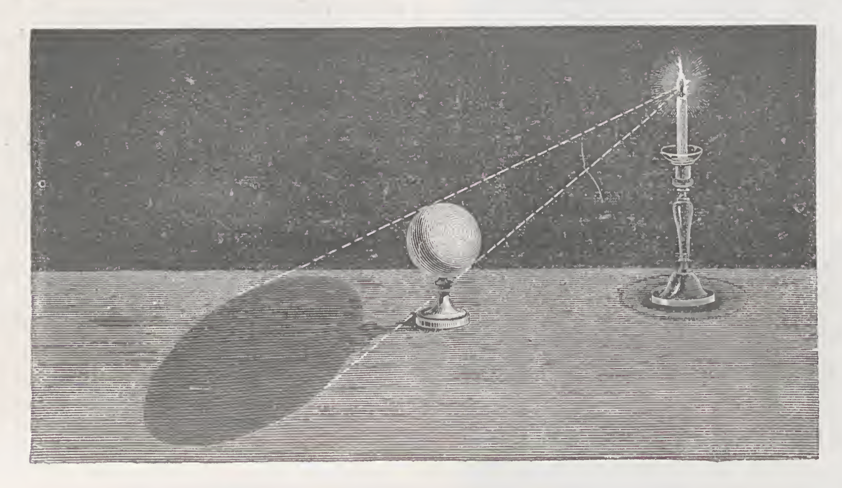


*Fig. 5.*—Cono de sombra de un cuerpo opaco

Supongamos ahora que, como suele acontecer en la práctica, el foco tenga dimensiones finitas, apreciables. En este caso, la superficie del cuerpo opaco y el espacio que lo rodea se componen de tres partes distintas: una cuyos puntos están á la vez alumbrados por toda la superficie luminosa, otra que no recibe rayo alguno, y la tercera, intermedia entre las otras dos, sólo recibe una fraccion mayor ó menor de la luz total. Así pues en la superficie del cuerpo hay, además de la sombra de éste y del cono de sombra proyectado en el espacio, una porcion ménos iluminada que se llama *penumbra*, y en el espacio un *cono de penumbra* que se proyecta de consuno hasta lo infinito. El exámen de la fig. 6 da fácilmente á comprender porqué el cono de sombra está limitado cuando el foco luminoso tiene mayores dimensiones que el cuerpo opaco, al paso que es infinito cuando estas dimensiones son menores: la sombra adquiriria la forma cilíndrica en el caso particularísimo en que el foco y el cuerpo opaco fuesen de iguales dimensiones y su posicion y forma semejantes.

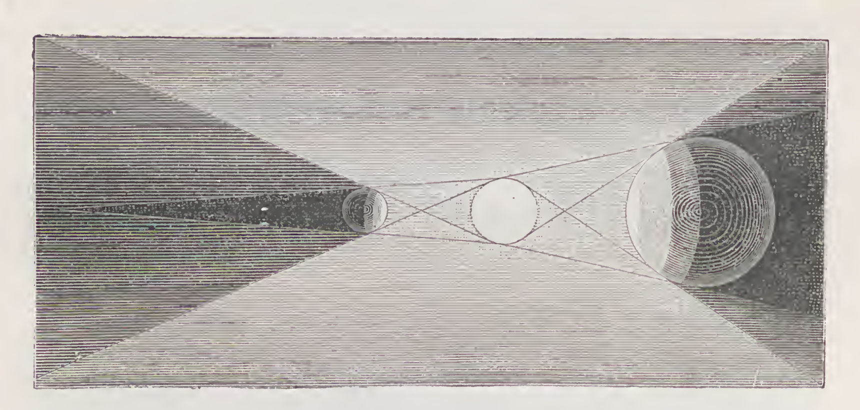


*Fig. 6.*—Conos de sombra y de penumbra

Estas son otras tantas consecuencias de la ley de propagacion rectilínea de la luz en los medios homogéneos; y la experiencia demuestra cuán cierta es esta ley, al ménos aproximadamente; mas conviene penetrarse de que no es susceptible de comprobaciones prácticas rigurosas; pues, en efecto, en la mayoría de los casos, las penumbras de los focos de luz de dimensiones finitas presentan más allá de los contornos de la sombra propiamente dicha degra-

daciones insensibles de intensidad, desde la luz llena hasta la sombra pura, y no es posible discernir exactamente la línea divisoria de la una ni de la otra. Si, por el contrario, se quiere reducir el foco á pequeñísimas dimensiones, se observan fenómenos singulares, fajas alternativas de luz y sombra que imposibilitan de todo punto la comprobacion de la ley.

Los eclipses de Sol y de Luna realizan en la naturaleza, y en la mayor escala, la teoría geo-

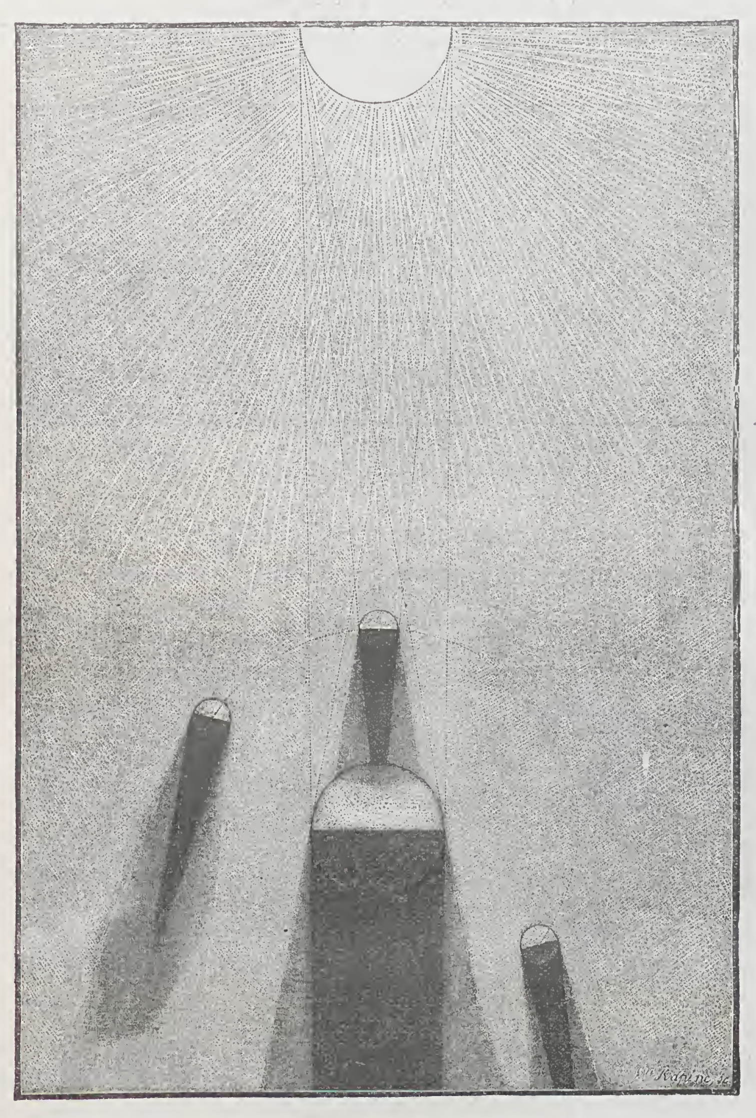


*Fig. 7.* — Eclipses de Sol y de Luna

métrica de las sombras y penumbras. Cuando el disco opaco de la Luna se halla interpuesto en línea recta entre el Sol y la superficie del globo terráqueo, la sombra proyectada constituye un eclipse, ya total ó bien anular del Sol, segun que las dimensiones aparentes del disco lunar sean mayores ó menores que las del Sol, ó lo que es lo mismo, segun que el vértice del cono de sombra de la Luna llegue ó no á la Tierra. A una y otra parte de la línea central oscura del eclipse hay una serie de localidades para las cuales el disco solar resulta más ó ménos eclipsado ó mordido por la Luna; estos lugares están en la penumbra, y para ellos hay eclipse parcial de Sol. Los eclipses de Luna, producidos al pasar este astro por los conos de sombra y de penumbra de la Tierra, tienen la misma causa y constituyen eclipses totales ó parciales de Sol para la Luna; sólo que la envolvente gaseosa que forma nuestra atmósfera modifica, conforme lo veremos más adelante, las dimensiones reales del cono de sombra terrestre, debiéndose tener en cuenta estas modificaciones para explicar las circunstancias variables del fenómeno de los eclipses lunares. Desde este punto de vista, la teoría geométrica de las sombras no se puede aplicar directamente á este caso particular.

En los demás cuerpos del sistema planetario ocurren otros fenómenos semejantes, que podemos observar. Tales son los pasos de Vénus y de Mercurio por el disco del Sol, los eclipses de los satélites de Júpiter, ó tambien las proyecciones de los conos de sombra de estos satélites en el disco luminoso del planeta. Merced á la observacion de los eclipses de los satélites de Júpiter se ha podido comprobar y medir por vez primera la velocidad de propagacion de la luz.

Tambien podemos comprobar diariamente en la superficie de la Tierra, aunque en realidad sólo por aproximacion, los efectos de iluminacion, de sombra y de penumbra que son consecuencias de la ley de propagacion rectilínea de la luz.

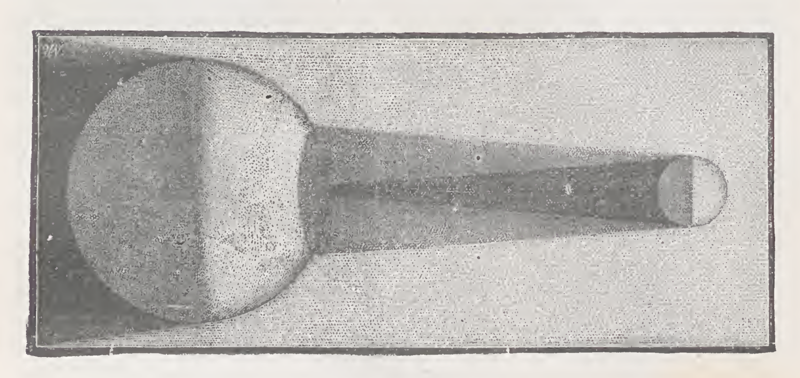


*Fig. 8.*—Eclipse total de Sol

Cuando la luz es directa y de suficiente intensidad, como la del Sol ó de un foco artificial, sea éste una lámpara, una bujía, un mechero de gas, etc., las sombras resultan relativamente limitadas; las partes iluminadas y las oscuras de los objetos se destacan con bastante limpieza y las penumbras no hacen más que suavizar los contornos; sin embargo, las sombras distan mucho de ser oscuras, á no ser que se trate de un recinto cerrado por todas partes; la luz se refleja en todas direcciones, ya por la iluminacion del aire mismo, ó ya por las partes alumbradas de los objetos que, respecto de las partes oscuras, hacen las veces de focos secundarios de luz. Pero si la luz es difusa, como sucede con la del Sol cuando este astro está velado por nubes ó nieblas, la iluminacion se difunde y se iguala hasta el punto de ser imposible notar la separacion entre la luz y las sombras. La aplicacion geométrica de la teoría de las sombras y penumbras, que en las artes del dibujo puede servir á los artistas en el primer caso, es imposible en el segundo, y el único recurso de que entónces se puede echar mano es la aplicacion ó imitacion empírica de dichos efectos.

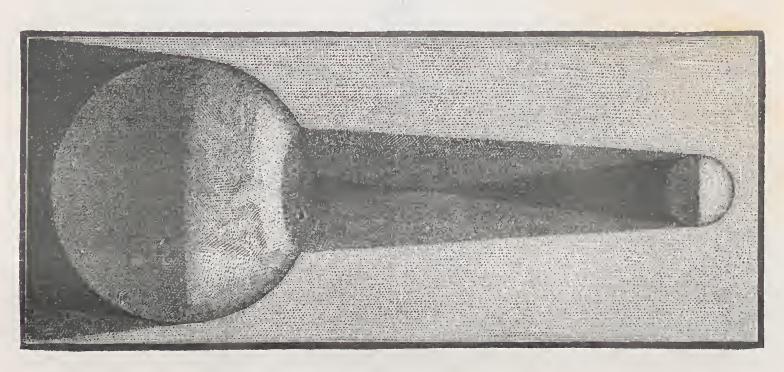


*Fig. 9.*— Eclipse anular de Sol

Los retratos y dibujos de papel ó carton cortado que sirven de juguete á los niños, son una aplicacion del efecto de claro-oscuro que producen las penumbras; el papel está cortado y desprendido en las partes que deben aparecer en plena luz y áun algo más, de modo que el efecto de la penumbra suaviza sus contornos. Cuando el papel cortado está muy cerca de la pared ó de la pantalla en donde se proyecta la sombra, son los perfiles muy duros y marcados, y no se consigue el objeto que se propuso el

artista, pero colocado el retrato á una distancia conveniente, las penumbras, más difundidas, producen el resultado apetecido (fig. 11); si la distancia es demasiado grande, las penumbras invaden las partes claras y la imágen resulta muy confusa.

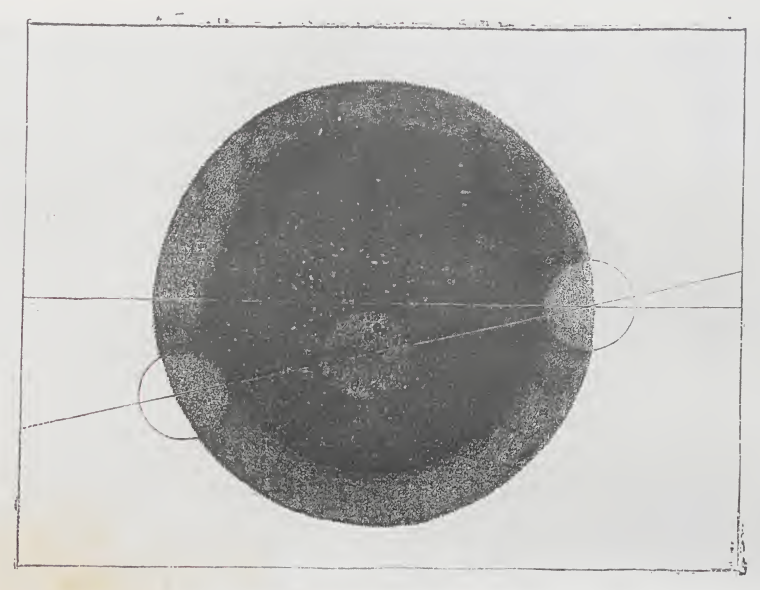


*Fig. 10.*—Eclipse total de Luna

## III

### LA CÁMARA OSCURA —IMÁGENES INVERTIDAS Y COLORADAS DE LOS OBJETOS EXTERIORES

La propagacion de la luz en línea recta explica los fenómenos que se observan en la cámara oscura.

Situémonos en una habitacion herméticamente cerrada, y de tal modo que sólo puedan



*Fig. 11.*—Efectos de sombra y penumbra. Siluetas de figuras recortadas

penetrar en ella los rayos del Sol por un agujerito hecho en una tabla delgada de una de sus ventanas: coloquemos entónces una pantalla blanca á cierta distancia del agujero, y aparecerá una mancha luminosa de forma circular ó elíptica tanto mayor cuanto más diste

la pantalla del orificio (fig. 3); esta mancha es la imágen del Sol.

Si en vez de la luz solar penetra en la cámara oscura la de una bujía, se verá reproducida en la pantalla la imágen de la vela y de la llama, pero invertida (fig. 12). La causa de esta inversion es muy sencilla. Los rayos que parten de la extremidad superior de la llama pasan por el agujerito, siguen su camino en línea recta en la cámara oscura y producen un punto luminoso en la parte inferior de la pantalla. Los que por el contrario parten de la base de la llama van á formar su imágen en un punto más elevado; los rayos intermedios forman rastros luminosos entre ambos puntos; por lo tanto, la imágen ha de aparecer naturalmente invertida, explicándose al mismo tiempo por qué existe la imágen y por qué ofrece esta disposicion par-



*Fig.* 12.—Imágen invertida de una bujía



*Fig.* 13.—Imágenes redondas y elípticas del Sol á través del follaje

ticular. Un naipe ó tarjeta, en que se hace un diminuto agujero con una aguja, da en la pantalla la imágen invertida de la bujía (fig. 12). La forma del orificio es, por lo demás, indiferente; redonda, cuadrada ó triangular, siempre reproduce la imágen del foco con su forma rigurosamente semejante. Supongamos, en efecto, que la abertura del postigo de la cámara oscura sea de forma triangular, y hagamos que penetren los rayos del Sol, de modo que se les pueda recibir en una pantalla colocada perpendicularmente á su direccion. Cada punto del disco luminoso



*Fig.* 14. —Imágenes producidas en la cámara oscura

dará un haz de luz, que penetrando por el agujero en forma de pirámide, se cortará en la pantalla segun una seccion de forma igual á la de la abertura, esto es, triangular. La imágen total del Sol estará pues formada por un número infinito de triángulos luminosos. Todos estos elementos se superponen, y como no hay punto alguno del contorno del disco que no dé el suyo, resulta que la forma de la imágen será rigurosamente la del Sol; si la pantalla estuviese colocada oblicuamente á la direccion de los rayos de luz, dicha forma seria elíptica.

Así se explica por qué en la sombra proyectada por un árbol, la luz que penetra entre los intervalos de las hojas tiene siempre la forma circular ó elíptica (fig. 13), segun que los rayos caen perpendicular ú oblicuamente sobre el suelo. Durante los eclipses de Sol, puede observarse que estas imágenes del astro presentan la forma de una media luna luminosa, tanto más escotada cuanto mayormente lo esté el disco solar: en el caso de que el eclipse sea anular, la imágen lo será tambien.

Si la ventana de la cámara oscura está enfrente de un paisaje iluminado por el Sol y áun por la luz difusa reflejada por un cielo despejado, se reproducirá en la pantalla la imágen de cada objeto, imágen invertida como acabamos de ver, y de este modo se obtiene una reproduccion fiel del paisaje (fig. 14). Si la pantalla es muy blanca, aparecerán admirablemente pintados todos los objetos con sus colores y matices, siendo más ricos y delicados los detalles cuanto más pequeña sea la abertura y más distante esté el paisaje.

Antes de pasar más adelante, y para facilitar el lenguaje, debemos decir lo que se entiende por *rayo*, por *pincel* y por *haz luminoso*. Dase el primer nombre á la serie de puntos considerados simultánea ó sucesivamente de que se compone cualquiera de las líneas seguidas por la luz; el segundo, al conjunto de un corto número de rayos emanados del mismo punto, y el de haz á la reunion de muchos rayos paralelos. Como se ve, los pinceles luminosos no son otra cosa sino pirámides ó conos que tienen su vértice en un punto del foco; pero cuando este se halla á bastante distancia, como sucede con el Sol y las estrellas, los rayos que parten de un punto del foco tienen tan escasa divergencia que se los puede considerar como rigurosamente paralelos.

# CAPÍTULO III

## VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA LUZ

### I

PRIMEROS ENSAYOS—MÉTODO DE RŒMER: VELOCIDAD DE LA LUZ MEDIDA POR LOS ECLIPSES DE LOS SATÉLITES DE JÚPITER

Los antiguos no creian que la luz invirtiera algun tiempo, por pequeño que fuese, en pasar del foco al punto iluminado por ella, del punto luminoso al ojo. En su concepto, esta trasmision era instantánea.

Bacon fué el primero, entre los modernos, que emitió la hipótesis de que la velocidad de propagacion de la luz no es infinita, y Galileo fué asimismo el primero que trató de averiguar prácticamente cuál era esta velocidad. Hé aquí de qué medio se valió: Dos observadores, provistos cada cual de una lámpara, se situaban de noche á 2,000 metros de distancia, habiendo convenido de antemano en que uno de ellos ocultaria su luz con una pantalla y que el otro haria lo propio en el preciso momento en que viese desaparecer la primera luz. Claro está que si el primer observador hubiera podido notar un intervalo de tiempo mensurable entre el instante en que tapaba su lámpara y el en que notaba la desaparicion de la segunda, dicho intervalo hubiera sido doble del que la luz invierte en recorrer la distancia que separaba en línea recta los dos puntos de observacion. Pues bien, no les fué posible apreciar ninguna diferencia de tiempo entre ambos fenómenos: las dos luces se apagaban al parecer á la vez. Los experimentos de Galileo, repetidos por los físicos de la Academia del Cimento á distancias triples de la primera, no produjeron resultado alguno.

Descartes, que tenia ideas especiales sobre la naturaleza de la luz, opinaba que su trasmision es absolutamente instantánea. Considerando los focos luminosos como asiento de una agitacion que se trasmitia á cualquier distancia por el intermedio de cuerpos duros y contiguos, comparaba el movimiento de la luz al de un palo, uno de cuyos extremos se mueve en el mismo momento en que se hace vibrar el otro (1). Así pues, para él la velocidad de la luz era infinita, y




*Fig.* 15.—Experimentos de Galileo. Primer ensayo de medicion de velocidad de la luz

creia ver la confirmacion de sus ideas acerca de este punto en un fenómeno astronómico en el que debiera haberse notado la influencia de la propagacion sucesiva de la luz si fuese positiva.

Este fenómeno es el de los eclipses de Luna.

Sabido es que hay eclipse de Luna, cuando en la época de la oposicion ó del plenilunio, los tres astros se hallan en línea recta. En otros términos, las longitudes del Sol y de la Luna deben en tal momento diferir en 180 grados, como lo indica la figura 16. Pero si la luz invierte un tiempo $t$ en recorrer la distancia TL, el observador no verá la Luna en oposicion sino $t$ segundos despues de su verdadero paso por L estará pues en L', y Descartes deducia de aquí que se veria desde la Tierra la Luna eclipsada en un punto del cielo que no estaria ya opuesto diametralmente al Sol. Como la observacion no permitia comprobar nada de esto, deducia además que la luz tiene una velo-

(1) Conviene hacer notar que el hecho mismo de la instantaneidad del movimiento del palo en sus dos extremos, hecho que sirve á Descartes de término de comparacion, no es exacto. Tan luégo como el cuerpo sólido que se somete á una presion ó una traccion tiene la suficiente longitud, se advierte que el movimiento invierte un espacio de tiempo muy apreciable en propagarse de un extremo á otro.

cidad infinita ó que se trasmite instantáneamente.

Huygens respondió á este argumento de Descartes haciendo observar que la distancia de la Luna á la Tierra es demasiado pequeña para que el retraso del principio ó del fin de un eclipse sea apreciable con nuestros medios de observacion. Pero debemos añadir, con todo el respeto debido á los sabios que han reproducido la objecion y la respuesta, que ni una ni otra son fundadas, por cuanto en el fenómeno

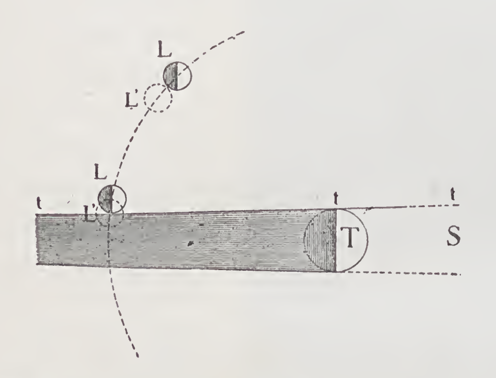



*Fig.* 16.—Posiciones relativas del Sol, de la Tierra y de la Luna en el momento de un eclipse

de los eclipses, lo propio que en los demás fenómenos lunares, no interviene, como creia Descartes, la trasmision sucesiva de la luz; es tan sólo causa de un retraso (constante para una misma distancia) en la observacion del fenómeno; pero este último aparece siempre en la verdadera direccion en que tiene efecto, si se considera inmóvil á la Tierra; y si no lo está, la desviacion (que es la aberracion) depende de la velocidad de la Tierra, no de la distancia del objeto observado.

En tal estado se hallaba el asunto, esto es, indeciso, cuando en 1675 el astrónomo dinamarqués Rœmer, llamado al Observatorio de Paris por Picard, tuvo ocasion de compulsar muchas observaciones de los satélites de Júpiter. Al examinar y discutir los eclipses del primer satélite ó sea del más inmediato al planeta, llamáronle la atencion ciertas diferencias entre los intervalos que median entre estos eclipses sucesivos y que tan pronto se notaban en un sentido como en otro, no siendo posible explicarlas por ninguna desigualdad en el movimiento del satélite. Rœmer comprendió al punto que la causa de estas anomalías procedia del cambio de distancia entre la Tierra y Júpiter, y del tiempo que la luz invertia en recorrer estas distancias desiguales.

Hé aquí cómo refiere la *Historia de la Academia de 1876* el descubrimiento del astrónomo danés.

«Estando calculadas con exactitud y en crecido número las revoluciones del primer satélite de Júpiter, y por consiguiente todos sus eclipses causados por la sombra del planeta, resultaba que en ciertas épocas salia de la sombra algunos minutos más tarde y en otras más pronto de lo que hubiera debido hacerlo, no acertándose á ver ningun motivo para esta variacion. Comparando Rœmer dichos períodos, vió que el satélite tardaba más en salir de la sombra precisamente cuando la Tierra se alejaba de Júpiter á causa de su movimiento ánuo, y ménos cuando se acercaba á él; y á consecuencia de esto ocurriósele la ingeniosa conjetura de que tal vez empleara la luz algun tiempo en difundirse. Esta suposicion le indujo á pensar que si el satélite tardaba más en salir de la sombra cuando estábamos más distantes de él, no era porque en efecto saliera más tarde, sino porque su luz invertia más tiempo en llegar á nosotros, porque habíamos huido de ella, por decirlo así. Por el contrario, cuando íbamos á su encuentro, debia parecernos más corta la permanencia del satélite en la sombra.

»Para comprobar la certeza de esta opinion, calculó la diferencia que podia haber entre las salidas de la sombra ó emersiones del satélite y los diferentes alejamientos de la Tierra, y vió que la luz retrasaba once minutos por una diferencia de distancia igual á la de la Tierra al Sol.»

En breve manifestaremos el valor que resulta para la velocidad de la luz del método inaugurado por el descubrimiento de Rœmer, cuando se introdujeron en los datos del problema los elementos más precisos de la astronomía contemporánea. Pero ántes, prosigamos ocupándonos del método mismo con algunos detalles y procuremos hacer comprender su principio con toda claridad.

Supongamos que un fenómeno luminoso, la inflamacion de un poco de pólvora, por ejemplo, se reproduzca periódicamente á intervalos iguales con todo rigor, como de 10 en 10 minutos por ejemplo. Sea cualquiera la distancia

á que se halle el observador del punto en que ocurre el fenómeno, es evidente que empezando á contar desde la primera explosion, se sucederán todas las demás con intervalos sucesivos de 10 minutos, sea la velocidad de la luz pequeña, considerable ó infinita, con tal que el observador permanezca á una distancia constante del punto en que se efectúan las explosiones.

Pero si el observador se aleja á partir del

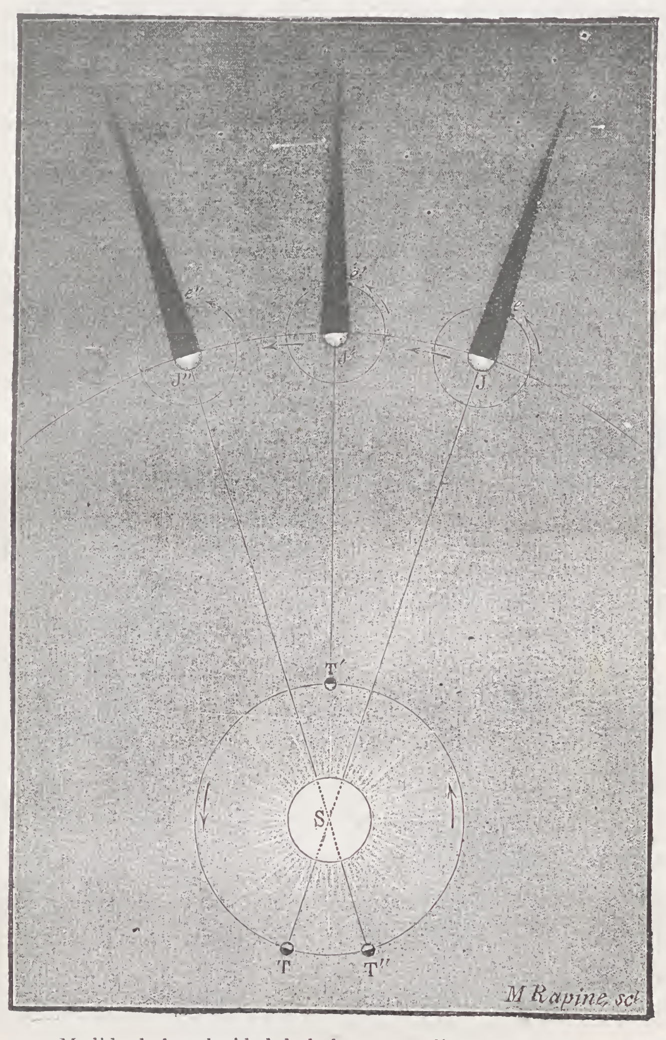



*Fig.* 17.—Medida de la velocidad de la luz por medio de los satélites de Júpiter

instante en que vió la primera explosion, es indudable que notará un retraso á cada una de las explosiones siguientes, cuyo retraso irá aumentando, y tendrá por causa el tiempo que la luz emplea en recorrer el camino indicado por el aumento de las distancias. A la duodécima explosion, por ejemplo, si se ha alejado 20 kilómetros y ha notado un retraso de 2 segundos, deducirá que la luz recorre 10 kilómetros por segundo. La misma consecuencia puede deducirse de un experimento análogo, si en vez de la aparicion de un punto luminoso, fuese objeto de la observacion la desaparicion periódica de una luz.

Pues bien, en el cielo ocurre un fenómeno de esta última clase. El planeta Júpiter va acompañado, en su movimiento de traslacion alrededor del Sol, de cuatro satélites ó lunas que giran periódicamente en torno suyo. Los planos de las órbitas de estos pequeños astros coinciden, ó poco ménos, con el de la órbita de Júpiter, y como este planeta es opaco, proyecta tras sí un cono de sombra cuyo eje tiene cierta inclinacion respecto del plano de su órbita. De aquí resulta que los satélites en sus revoluciones sucesivas alrededor del planeta central, suelen atravesar este cono en la época de sus oposiciones. Durante todo el tiempo que invierten en recorrer la sombra queda interceptada la luz que reciben del Sol, y sufren por tanto un eclipse.

Los eclipses de los satélites de Júpiter son

muy frecuentes, especialmente los de los tres más próximos al planeta, siendo fácil observar desde la Tierra sus inmersiones y emersiones, valiéndose de un anteojo de mediana potencia. Cuando el punto luminoso, arrastrado por su movimiento de revolucion alrededor del planeta, penetra en el cono de sombra, se apaga su luz: este es el instante de la *inmersion*. Continúa entónces su marcha hasta el instante en que, saliendo del cono, vuelve á aparecer su luz: este es el momento de la *emersion*. Desde la Tierra no son visibles ambos fenómenos en un mismo eclipse; pues por lo que hace á los dos satélites más cercanos á Júpiter, los oculta el cuerpo opaco del planeta tanto en el momento de su inmersion como en el de la emersion. Además, no se les puede observar en manera alguna en la época de la conjuncion ni de la oposicion, porque entónces el cono de sombra se halla enteramente oculto por el disco del planeta, como se comprende fácilmente examinando la figura 17. Tambien se comprende con no menor facilidad porqué son visibles para nosotros las inmersiones desde la época de la conjuncion á la de la oposicion siguiente, al paso que las emersiones son, por el contrario, visibles de la oposicion á la conjuncion.

Con efecto, Júpiter camina en el mismo sentido que la Tierra, pero se mueve en su órbita con mayor lentitud que esta: cuando la Tierra está en T y Júpiter en J, en la prolongacion del radio vector T S, es la época de la conjuncion. A contar desde este instante, describe la Tierra cierto arco en su órbita y Júpiter otro arco de menor amplitud en la suya, de modo que el observador se encuentra trasportado hácia la derecha del cono de sombra de Júpiter y desde este momento puede ver las inmersiones de los satélites. Las mismas circunstancias se reproducen cuando estando la Tierra en T', Júpiter se halla en J', en la prolongacion del radio como ántes, pero al lado opuesto al Sol, es decir, hasta la oposicion. Entónces, debido á los movimientos simultáneos de la Tierra y Júpiter, se dirige el primero de estos planetas á la izquierda del cono de sombra proyectado por el segundo, y en este caso son visibles las emersiones de los satélites hasta la nueva conjuncion T″ J″.

Comprendidos estos preliminares, nos será ya fácil explicar cómo han podido los astrónomos deducir la velocidad de la luz por las observaciones de los eclipses de que acabamos de hablar.

Consideremos, por ejemplo, el primer satélite, esto es, el que se encuentra más cerca del planeta (1). Su movimiento de revolucion se conoce con bastante exactitud para poder calcular fijamente los intervalos de sus eclipses, es decir, los intervalos que separan dos inmersiones ó dos emersiones consecutivas. Ahora bien, la observacion indicó á Rœmer y á todos los observadores que le sucedieron que las duraciones de estos intervalos no son constantes; parece que se acortan á medida que la Tierra se acerca á Júpiter, aumentando por el contrario cuando se aleja; en las épocas en que las distancias entre ambos astros tienen poca variacion permanecen sensiblemente iguales los períodos. Si se calcula, pues, segun la duracion media de los intervalos que separan dos inmersiones consecutivas, la época de una inmersion futura, y se compara el resultado del cálculo con el que se obtiene de la observacion, se nota que el fenómeno parece retardarse si la Tierra se aleja de Júpiter, y parece que se adelanta si por el contrario se acercan ambos cuerpos. Por otra parte, el atraso y el adelanto están siempre en proporcion exacta del aumento y de la disminucion de la distancia de entrambos planetas.

No es pues dudoso que la diferencia entre el resultado del cálculo y el de la observacion proviene del tiempo que invierte la luz en recorrer las distancias desiguales de que acabamos de hacer mencion.

Delambre ha deducido de la discusion de más de 100 eclipses de los satélites de Júpiter que de la conjuncion á la oposicion ó de esta á aquella, las acumulaciones sucesivas de estas diferencias producian un adelanto ó un retroce-

---

(1) Por muchas razones se ha elegido con preferencia el primer satélite: se conocen con más precision los elementos de su órbita, que es casi circular; el plano coincide ó poco ménos con el de la órbita de Júpiter, de suerte que ocurren los eclipses á cada revolucion, siendo por tanto muy frecuentes, toda vez que la duracion de la revolucion del satélite no es más que de 1 3/4 dia. Su distancia media al centro de Júpiter es sólo igual á seis radios del planeta; á esta distancia la penumbra que acompaña al cono de sombra es casi insensible, de suerte que el eclipse del punto luminoso se efectúa de un modo más brusco, con mayor limpieza, y por consiguiente es más precisa la observacion del momento de la desaparicion ó de la emersion.

so total de unos $16^m\ 26^s,5$ (1). Pues bien, las distancias T J, T″ J″ exceden de la distancia T' J' la misma cantidad, que es precisamente el diámetro de la órbita terrestre. La luz necesita pues 16 minutos 26 segundos para recorrer la longitud de este diámetro, ú 8 minutos 13 segundos ($493^s,243$) para recorrer su mitad, que es la distancia del Sol á la Tierra.

Esto sentado, si se divide el número que marca la distancia media de la Tierra al Sol por 493,243, se tendrá la velocidad de la luz, es decir, el número de kilómetros que atraviesa en un segundo de tiempo medio: $V = \frac{D}{t}$.

En tiempo de Rœmer no se habia podido aún calcular la distancia del Sol sino con mediana aproximacion; hemos visto además que tampoco se conocia con exactitud el número *t*, de suerte que se valuaba harto rudimentariamente la velocidad real de la luz. Los trabajos de Delambre han dado á conocer *t* con cierta precision de la cual no ha sido posible pasar; en cuanto á la distancia ó á la paralaje del Sol, los pasos de Vénus de 1761 y 1769 permitieron calcularla con una aproximacion mucho mayor que las evaluaciones anteriores. Más adelante indicaremos los diferentes valores que resultarian, para la velocidad de la luz determinada con arreglo á este primer método, de la adopcion de tal ó cual valor de la paralaje solar.

Lo que conviene retener del descubrimiento de Rœmer es que ha patentizado la propagacion sucesiva de la luz en los espacios interplanetarios, y por vez primera ha hecho posible la determinacion numérica de la velocidad con que tiene efecto esta propagacion. Pero dicho descubrimiento contiene varias causas de incertidumbre, una de las cuales consiste en la dificultad con que tropiezan los observadores para anotar con precision el momento de la desaparicion del satélite. Esta desaparicion no es instantánea, porque se trata de un cuerpo de dimensiones finitas, de un disco luminoso que penetra poco á poco en el cono de sombra, y segun la potencia de los anteojos con que se observe el fenómeno, así parecerá más ó ménos retrasada la completa desaparicion del punto luminoso; observacion que, si bien en sentido inverso, cabe hacer con respecto á las emersiones de los satélites. Otra causa de incertidumbre, y la más importante por cierto, es la que procede del valor que se adopte para la paralaje solar.

## II

### LA ABERRACION.—VELOCIDAD DE LA LUZ COMPARADA CON LA DE LA TIERRA

En 1675, Rœmer vió que la luz necesitaba cierto espacio de tiempo para llegar á mayor ó menor distancia y calculaba aproximadamente, si no la velocidad absoluta de esta trasmision, por lo ménos la que emplea un rayo luminoso para recorrer de punta á punta el diámetro de la órbita terrestre. A los cincuenta años de este memorable descubrimiento, esto es, en 1725, el astrónomo inglés Bradley halló en un fenómeno celeste mucho más general que los eclipses la confirmacion de los resultados obtenidos por Rœmer. La *aberracion* es en efecto una consecuencia inmediata de la velocidad de la luz combinada con la de traslacion de la Tierra alrededor del Sol.

Así como Rœmer, al emprender el estudio de los satélites de Júpiter, no pensaba en el problema de la trasmision de la luz, tampoco Bradley, al dedicarse á medir las insignificantes desviaciones de algunas estrellas zenitales, tenia en mientes la importante consecuencia que dedujo de sus observaciones. Proponíase averiguar si estas estrellas tenian una paralaje sensible, es decir, si por la sola circunstancia de la traslacion anual de la Tierra, sufren el cambio de posicion aparente que indica la geometría y que depende inmediatamente del movimiento de la Tierra y de la distancia de la estrella á nuestro sistema. Aprovechando Bradley la instalacion reciente, hecha por Molyneux en el observatorio de Kew, de un excelente instrumento construido por Graham con este objeto especial, observó la estrella *gamma* de la constelacion del Dragon durante el mes de diciembre de 1725, y muy en breve reconoció que esta estrella tenia un movimiento hácia el Sur, movimiento cuya explicacion no podia atribuir á los errores de los instrumentos ni á la incertidumbre de las

(1) Rœmer obtuvo por resultado 11 minutos como tiempo que la luz invierte en recorrer el diámetro de la órbita terrestre; otros sabios dedujeron cifras más altas: Duhamel $15^m$, Horrebow $14^m\ 7^s$, Cassini $14^m\ 10^s$, Newton $7^m\ 30^s$, y por último Delambre, segun hemos dicho, $8^m\ 13^s$ ó más exactamente, $493^s,243$.

observaciones. Además, este movimiento era precisamente en sentido contrario al que habria debido dar la paralaje, y que continuó hasta marzo, en cuyo mes llegó á 20 , cantidad que representaba la distancia á que la estrella se habia alejado del polo durante aquellos tres meses. El astro prosiguió entónces su marcha hácia el Norte, y en junio volvió á hallarse en el punto de partida de diciembre. En setiembre estaba 20″ más al Norte, luégo volvió al Sur para recobrar por segunda vez en diciembre su posicion primitiva. Bradley no pudo explicarse estas oscilaciones, ni apelando á la hipótesis de una nutacion del eje de la Tierra, ni á la refraccion atmosférica. Por último, ocurriósele la idea de ver si dichos fenómenos tendrian por causa la velocidad con que los rayos de luz llegan hasta el observador, que á su vez va trasportado en el espacio por el globo en que está situado con velocidad mucho menor por cierto que la de los rayos luminosos. Tal es en efecto la verdadera razon del fenómeno descubierto por Bradley, fenómeno que muy luégo conoció ser comun á todas las estrellas y al que el ilustre astrónomo inglés dió el nombre de *aberracion*.

Sea BT la posicion del eje del anteojo en el momento en que el observador contempla el astro. Este eje indica la direccion aparente de los rayos luminosos, de suerte que á la estrella se la ve en *e* en la bóveda celeste. Miéntras el rayo luminoso ha recorrido la longitud BT, la Tierra se ha trasladado á su vez de B á C, y con ella el anteojo lo propio que el observador. La verdadera marcha seguida por el rayo es la línea TC, que desde entónces representa en realidad la direccion de los rayos emanados de la estrella. La posicion efectiva de ésta en la bóveda celeste es por consiguiente E; allí se veria la estrella si la Tierra estuviese inmóvil. En una palabra, la direccion aparente no es otra cosa sino la de la resultante de los dos movimientos de la luz por una parte, y de la Tierra por otra; es la diagonal del paralelógramo formado por dos líneas proporcionales á las dos velocidades y trazadas en las direcciones de los dos movimientos. Así pues, las velocidades simultáneas de la luz y de la Tierra deben causar y causan en efecto una desviacion en la direccion de los rayos luminosos emanados de un punto que no participa del movimiento de nuestro globo. Esta desviacion, á sea el ángulo ET*e*, es la que constituye la aberracion, hecha evidente por Bradley al observar las estrellas zenitales. La velocidad de la luz es constante; la de la Tierra varía en muy reducidos límites.

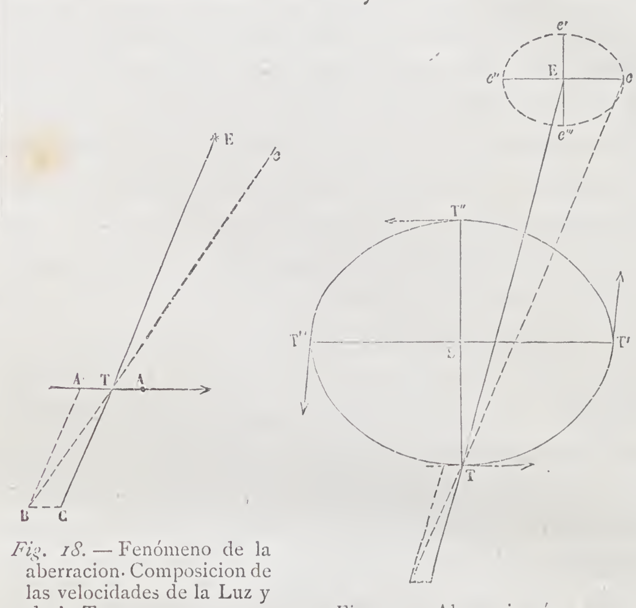



*Fig. 18.* — Fenómeno de la aberracion. Composicion de las velocidades de la Luz y de la Tierra

*Fig. 19.* — Aberracion ánua

Los lados BC y CT del triángulo no cambian, pero no sucede lo propio con el ángulo que forman entre sí, á no ser que se considere una estrella situada en el polo de la eclíptica ó á corta distancia de él. En *e* (fig. 19) se verá otra estrella semejante E cuando la Tierra está en T de su órbita, y en *e*', *e*'', *e*''', cuando ocupa sucesivamente las posiciones T', T'', T'''. En una palabra la estrella está siempre más adelante de su posicion real del ángulo de aberracion, de suerte que en un año parece trazar un círculo paralelo á la órbita terrestre, con la particularidad de que siempre parece 90° adelantada á la Tierra. El ángulo de aberracion maximum es algo mayor de 20°. Las últimas mediciones, hechas por Otto Struve, dan 20″,445, de suerte que el diámetro del círculo es de 40″,89. En cuanto á las estrellas situadas fuera del polo de la eclíptica, resulta que describen anualmente elipses cuyo eje mayor, paralelo á la eclíptica, tiene tambien 40″,89, y el menor disminuye con la latitud de la estrella. Estas elipses se reducen en el plano de la eclíptica á líneas rectas, y cuando la Tierra está en uno ú otro extremo del diámetro que va á parar á la estrella, el ángulo de aberracion es nulo, lo cual se comprende, porque entónces la direccion del movimiento de la Tierra es precisamente opuesta á la de los rayos luminosos, ó bien coincide con ella.

Para que se comprenda bien el fenómeno de la aberracion de la luz y su causa, vamos á demostrar la analogía que hay entre él y los hechos que pueden observarse fácilmente en la superficie de la Tierra.

Consideremos un barco que navegue en la direccion AB con determinada velocidad. Una batería situada en la costa le dispara un balazo que va á dar en su casco en el punto *a* y prosigue su marcha sin que el primer choque le haya hecho cambiar su direccion *ab*. Si el barco estuviese inmóvil, la bala atravesaria el costado opuesto por el punto *b*, y la línea *ab* que reuniria los dos agujeros abiertos por el proyectil marcaria precisamente la direccion del tiro y la de la boca de fuego; pero miéntras la bala recorre la línea *ab*, ó atraviesa el buque, este ha avanzado de AB á $A_1$ $B_1$; en la hipótesis de la inmovilidad del barco, el punto que hubiera sido atravesado por la bala ha avanzado á *b'* y esta abre el costado por un punto que dista del primero *bb'*. En lugar de la direccion *ba* que es la verdadera, el observador situado en el buque juzgará de la direccion del tiro por la línea *ba* y le parecerá que la bala procede del punto *c'*. La desviacion *aba* tiene por causa la combinacion de las velocidades del proyectil y del barco: es un efecto de la aberracion. Si la bala hubiese llegado por la proa ó por la popa de la embarcacion, en la direccion misma de su marcha, la desviacion seria nula á no dudarlo.

Desde un tren en marcha podemos observar un fenómeno parecido cuando examinamos las gotas de lluvia. Supongamos, para mayor sencillez, que la lluvia cae verticalmente: si el wagon está parado, el viajero verá cómo caen las gotas en una direccion paralela á la de los bordes de la ventanilla, como así es en efecto. Mas tan luégo como el tren echa á andar, la apariencia cambia; parece que la lluvia cae oblicuamente, como si la empujase un viento procedente del punto del horizonte hácia el cual marcha el tren, y la oblicuidad de las gotas será tanto mayor cuanto más de prisa corra el tren. Fácilmente se comprende que una gota *a* que habria caido siguiendo la línea *ab*, paralela al lado de la portezuela, caiga en efecto en el espacio siguiendo dicha línea, pero al llegar á la parte inferior de su carrera, el wagon y la portezuela han avanzado de A á B y la gota cae en el punto *b* de esta última, de suerte que al viajero le ha parecido que seguia la línea *a'b*.

Un transeunte que estuviese parado resguardándose con su paraguas de la lluvia que cae verticalmente, no recibiria una sola gota; pero si anda algo de prisa en cualquier direccion,

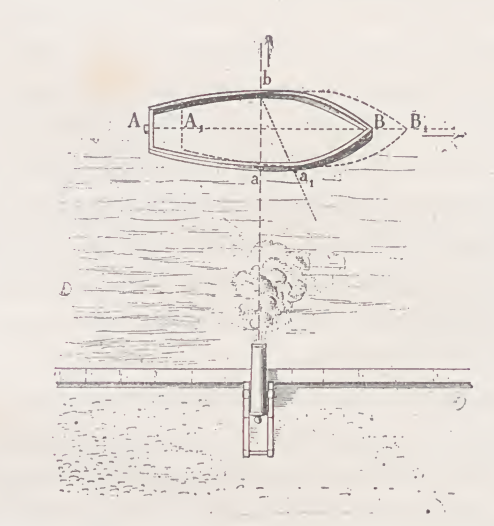



*Fig. 20.*—Desviacion aparente de un proyectil que toca á un buque en marcha

se mojará y creerá recibir la lluvia oblicuamente, en sentido opuesto al de la direccion que sigue. Si se supone que recorre así toda una circunferencia de círculo, la lluvia le azotará el rostro como si cayera sucesivamente de todos los puntos del horizonte. Este es un fenómeno análogo por todos conceptos al de la aberracion de la luz, y cuyos maximums y minimums variarian del propio modo si se supusiera que la lluvia, en lugar de caer verticalmente, tomaba en realidad todas las direcciones posibles de oblicuidad al horizonte. La Tierra recibe en todo tiempo y en todas direcciones rayos de luz emanados de todos los puntos de la bóveda celeste: es una lluvia continua de moléculas, ó si se prefiere, de ondas luminosas.

La aberracion es un fenómeno comun á todos los astros, lo mismo al sol que á las estrellas y planetas. Así pues, para conocer la posicion verdadera de estos cuerpos deben tener en cuenta los astrónomos, entre otras correcciones, las alteraciones que resultan para las coordenadas á las cuales suelen referir dichas posiciones, ascensiones rectas y declinaciones, longitudes y latitudes.

Puesto que la aberracion depende á la vez de la velocidad de la luz y de la del observador,

es decir, del globo en que éste se halla, resulta de aquí que además de la aberracion relativa al movimiento de traslacion de la Tierra, hay tambien una desviacion análoga debida al movimiento de rotacion. Pero este movimiento es mucho ménos rápido que el primero, puesto que en el ecuador, en que su velocidad llega al

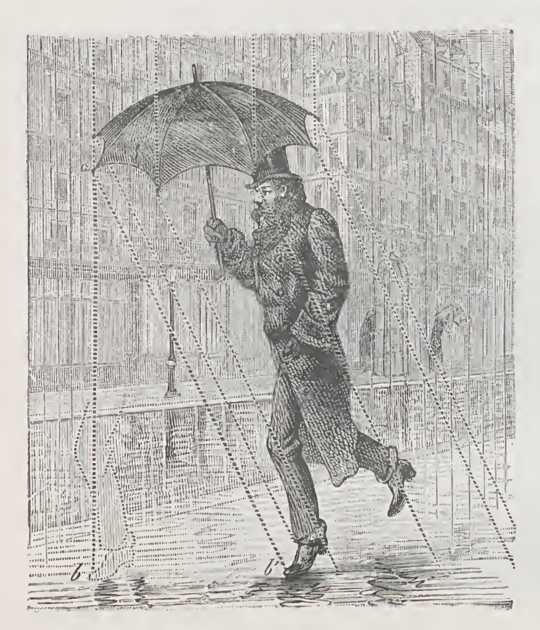


*Fig. 21.*— Fenómeno análogo á la aberracion

maximum, no excede ni siquiera llega á 500 metros por segundo, esto es, apénas equivale á la 650,000.ª parte de la velocidad de la luz.

Por último, hay otra causa que debe intervenir forzosamente en el fenómeno de la aberracion para modificar su valor, y que no parece despreciable. Al discutir los astrónomos el conjunto de los movimientos propios de las estrellas, han reconocido que el sistema solar entero avanza por el espacio, y que el Sol, arrastrando consigo los planetas, sus satélites y los cometas del sistema, tiene un movimiento de progresion hácia un punto del cielo situado en la constelacion de Hércules. Siendo así, la Tierra debe tener, además de la velocidad de sus dos movimientos de rotacion y de traslacion, otro de avance paralelo al de todo el sistema (1). Por consiguiente se averiguará cuál es el movimiento absoluto de un observador situado en su superficie buscando la resultante de estos tres movimientos. La aberracion de una estrella, tal cual ha sido calculada teniendo en cuenta solamente los dos primeros (ó mejor dicho tan sólo el movimiento de traslacion, por hacerse poco aprecio del de rotacion), debe variar en las diferentes épocas del año; las máxima ó mínima de estas variaciones dependerán de la situacion de las estrellas y de las direcciones relativas del movimiento de la Tierra en su órbita y del de traslacion del sistema solar. Falta saber si la observacion confirma estas consideraciones teóricas, cuya exactitud es evidente.

---

Hemos visto que el método empleado por Rœmer para medir la velocidad de la luz no la da en su magnitud absoluta, sino que tan sólo permite calcular el tiempo que invierte una onda luminosa en atravesar el radio de la órbita de la Tierra. Para deducir el camino recorrido en un segundo, es preciso conocer este radio y haber medido la distancia de la Tierra al Sol, ó si se quiere, conocer la paralaje de este último astro. En tiempo de Rœmer no se habia medido este elemento, por lo ménos con alguna precision; lo ha sido despues, siquiera subsistan algunas incertidumbres sobre las últimas cifras que lo representan. Pero lo que sí se ha podido calcular es la relacion de la velocidad de la luz con la de la Tierra, habiéndose visto que la primera es igual á 10,190 veces la segunda.

La medida del ángulo de aberracion conduce tambien fácilmente al cálculo de la misma relacion, y adoptando las cifras deducidas por Otto Struve, resulta que la velocidad de la luz es igual á 10,100 veces la de la Tierra.

En ciertas ocasiones se confunde con la aberracion un fenómeno de desviacion distinto de ella, por cuanto proviene, no del movimiento del observador, sino por el contrario, del del astro observado y de su distancia, al paso que la aberracion es independiente de la distancia del astro del que emana la luz. Veáse cuál es dicho fenómeno:

Consideremos un planeta. En el momento en que el astrónomo lo ve en el foco de su anteojo, nota una posicion aparente que debe corregirse de la aberracion para conocer la posicion verdadera, ó con más exactitud, para tener la direccion verdadera del rayo luminoso emanado de él. Pero este rayo ha salido del

(1) Segun las investigaciones de M. Struve, la velocidad de traslacion del sistema solar en direccion de la constelacion de Hércules es igual á unos 7,6 kilómetros por segundo. Es la cuarta parte de la velocidad media de la Tierra alrededor del Sol, y por consiguiente la 40,600.ª de la velocidad de la luz.

planeta en una época anterior, dado que la luz ha debido invertir un espacio de tiempo determinado en recorrer la distancia que separa al astro de la Tierra. Durante este tiempo, el planeta, que tiene un movimiento propio, ha cambiado en realidad de lugar en su órbita, y su posicion verdadera en el instante físico de la observacion no es ya la que el observador anota, áun despues de haberla corregido de la aberracion. Por lo que respecta á los varios planetas, la diferencia de tiempo de que hablamos varía entre límites bastante considerables, pero tambien varía para un mismo planeta, puesto que en el curso de una de sus revoluciones sinódicas, cambia tambien de distancia. El cuadro siguiente marca los máxima y mínima de estas desigualdades, así como el ángulo de aberracion de cada planeta, ángulo que varía necesariamente de uno á otro, pues siendo constante la velocidad de la luz, la del astro en su órbita va disminuyendo á medida que se aleja del Sol.

| NOMBRES de los planetas | ANGULO de aberracion | TIEMPO QUE INVIERTE LA LUZ EN LLEGAR | | |
|---|---|---|---|---|
| | | del planeta al sol | del planeta á la tierra | |
| | | | 1.° *á la distancia minimum* | 2.° *á la distancia maximum* |
| Mercurio. . . . . . . . . . | $32''$ | $3^m 11^s$ | $4^m 32^s$ | $10^m 18^s$ |
| Vénus. . . . . . . . . . | $23''5$ | $5^m 57$ | $2^m 36$ | $14^m 18$ |
| La Tierra. . . . . . . . . . | $20''445$ | $8^m 15$ | » | » |
| Marte. . . . . . . . . . . | $14''7$ | $12^m 34$ | $3^m 5$ | $22^m 4$ |
| Júpiter. . . . . . . . . . . | $8''8$ | $42^m 55$ | $34^m 15$ | $53^m 13$ |
| Saturno. . . . . . . . . . . | $6''5$ | $1^h 18^m 42$ | $1^h 6^m$ | $1^h 31^m 34$ |
| Urano. . . . . . . . . . . | $4''5$ | $2^h 38^m 15$ | $2^h 22^m 40$ | $2^h 53^m 15$ |
| Neptuno. . . . . . . . . . | $3''7$ | $4^h 7^m 57$ | $3^h 57^m 40$ | $4^h 22^m 20$ |

## III

### MEDICION DIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ.—MÉTODO DE M. FIZEAU

Los dos métodos anteriormente expuestos conducen tan sólo indirectamente á la solucion del problema que tiene por objeto la medicion de la velocidad de la luz. La exactitud de la cantidad que resulta valiéndose de uno ú otro de ambos métodos está subordinada al conocimiento de un elemento astronómico, la paralaje del Sol. Era pues importante averiguar por medio de métodos puramente físicos la velocidad de la luz, y comprobar por la comparacion de los resultados de tal suerte obtenidos la mayor ó menor exactitud de los datos astronómicos sobre las dimensiones de la órbita terrestre, y por consiguiente sobre las del sistema solar. Dos sabios franceses, los Sres. Fizeau y Leon Foucault, han llegado á este resultado, cada uno por su parte. Describiremos sucesivamente los procedimientos empleados por ambos físicos, los experimentos que han hecho y los resultados que cada cual ha obtenido.

Empecemos por el método de M. Fizeau.

Su principio es el siguiente: Supongamos una pantalla movible situada delante de un foco luminoso: si se levanta la pantalla, la luz pasa y á bastante distancia va á dar en un espejo plano colocado perpendicularmente á la direccion seguida por el haz luminoso. El espejo refleja este haz que, volviendo sobre sí mismo, recorre de nuevo, pero en sentido inverso, la distancia del espejo al foco. Si durante el espacio de tiempo que la luz ha invertido en franquear la doble distancia, en ir del foco al espejo y de éste á aquél, se ha bajado la pantalla, la luz interceptada no volverá á su punto de partida. La cuestion consiste en saber cuánto tiempo podrá permanecer la pantalla levantada cuando se ha llenado ya la condicion de interceptacion, tiempo que será precisamente el que emplee la luz en recorrer el doble camino de la pantalla al espejo.

Veamos de qué medio se ha valido M. Fizeau para realizar, para aplicar este principio, tal como lo hemos resumido. El aparato de que ha hecho uso está representado en su parte más esencial en la figura 22. Se compone de dos partes: una, la de la derecha del grabado, esta-

ba situada en Suresnes, punto de partida de los rayos luminosos; otra, la de la izquierda, lo estaba en Montmartre, punto de llegada.

La luz de una lámpara envia un haz de rayos luminosos á un sistema de dos lentes, colocados en un tubo lateral, y dicho haz se refleja en un espejo M, compuesto de un pedazo de cristal sin azogar, inclinado 45° respecto de la direccion de los rayos luminosos. El haz, despues de su reflexion, converge en un punto que es precisamente el foco del objetivo de un anteojo que da paralelismo á los rayos, los cuales recorren la distancia que separa las dos estaciones.

Al llegar á Montmartre, atraviesa el haz el objetivo de otro anteojo, y va á concentrarse en un espejo que lo refleja, segun la misma direccion que traia, sobre el primer espejo inclinado, atraviesa el cristal sin azogar, y el observador puede examinarlo provisto de un ocular. Como vemos, por medio de esta disposicion, M. Fizeau ha podido observar en Suresnes la imágen de una luz colocada á su lado, despues de haber recorrido sus rayos el doble trayecto que hay desde Suresnes á Montmartre.

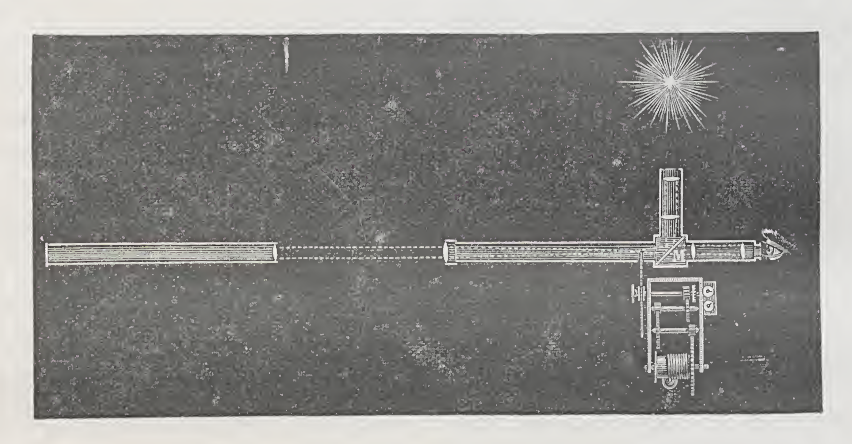



*Fig. 22.*— Aparato de M. Fizeau para determinar la velocidad de la luz

Toda la cuestion se reduce á averiguar el tiempo que emplea la luz en franquear este doble intervalo; para conseguirlo, M. Fizeau colocaba en el camino de los rayos, algo hácia adelante del espejo M y en el punto en que los rayos emanados de la lámpara forman su foco, los dientes de una rueda, á la cual un aparato de relojería imprime un movimiento de rotacion muy rápido y uniforme.

Siempre que el movimiento de la rueda coloca un diente en el curso del haz, haciendo las veces de una pantalla ú obturador, queda la luz interceptada, al paso que atraviesa libremente el espacio que separa un diente de otro, cuyo efecto total viene á ser como si alternativamente se bajara y levantara una pantalla opaca en el curso del haz luminoso. Supongamos que al principio de la rotacion, inmóvil aún la rueda, presenta uno de sus vacíos al paso de la luz; el observador distinguirá la imágen del punto luminoso sin que se amortigüe el brillo de éste; si entónces gira la rueda, pero con tal velocidad que cada diente emplee para venir á ocupar el sitio del vacío que le sigue mayor espacio de tiempo del que necesita la luz para ir á Montmartre y volver á Suresnes, sucederá que al volver el rayo luminoso hallará todavía libre el camino por el mismo vacío que atravesó en su viaje de ida; el punto luminoso continuará siendo visible, pero á medida que aumenta la velocidad de rotacion, disminuye la intensidad de la luz, porque de todos los rayos luminosos que atraviesan cada uno de estos intervalos, hay un número creciente que á su vuelta hallan interceptado el paso. Si, por último, la velocidad de la rueda llega á ser tanta que el tiempo que emplea un diente en venir á ocupar el puesto del vacío que le precede es precisamente igual a que invierte la luz en recorrer la doble distancia que hay entre una y otra estacion, no hay un solo rayo de luz que atravesando la rueda á la ida, deje de encontrar cerrado el paso á la vuelta, y por tanto habrá un eclipse continuo del punto luminoso miéntras persista la velocidad de que hablamos.

Con esto basta, pues un contador adaptado á la rueda da á conocer el número de vueltas que efectúa por segundo; conócese tambien el

número de dientes y el de los espacios vacíos, y asimismo conocemos el tiempo que emplea un diente en ocupar el sitio de un vacío (1), que como acabamos de ver es rigurosamente igual al que invierte la luz en recorrer dos veces los 8,633 metros que separan ambas estaciones.

Por este procedimiento halló M. Fizeau que la velocidad de la luz era de 315,000 kilómetros por segundo, número que se aproxima mucho al obtenido de los eclipses de los satélites de Júpiter, cuando se adoptaba la distancia del Sol, deducida de la antigua paralaje de este astro.

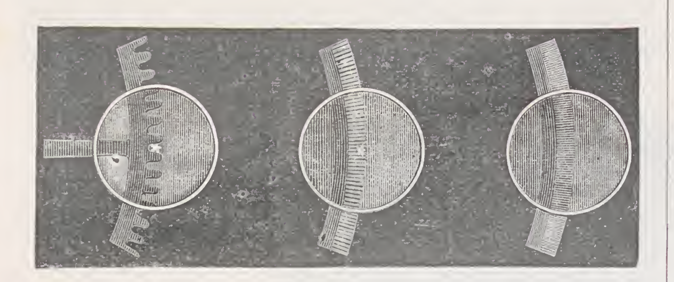


*Fig. 23.*—Experimentos de M. Fizeau: 1 punto luminoso visto á través de los dientes de la rueda inmóvil; 2 eclipse parcial del punto luminoso; 3 eclipse total.

M. Fizeau hizo en 1849 los notables experimentos de que acabamos de hacer mencion. En estos últimos años los ha reproducido M. Cornu, uno de los más notables físicos franceses, el cual, sin modificar en nada el método en su principio, lo ha perfeccionado bajo diferentes aspectos. Una de las dificultades del procedimiento empleado por Fizeau consiste en la medicion exacta de la velocidad de rotacion de la rueda dentada en el momento de la desaparicion ó del eclipse del punto luminoso, lo propio que en el de la reaparicion; para obviarla se habia esforzado en hacer constante, por espacio de un minuto próximamente, la velocidad que correspondia á estos máxima ó mínima de luz.

M. Cornu al hacer sus experimentos, ha preferido dar á la rueda dentada una velocidad creciente ó decreciente segun una ley regular, anotando automáticamente la rapidez de este movimiento por medio de una corriente eléctrica; otra corriente le permitia tambien registrar los momentos precisos de las apariciones ó desapariciones del punto luminoso. En el cilindro con una capa de negro de humo en el cual se traza gráficamente el número de vueltas de la rueda dentada, otra línea marca los puntos *ab* correspondientes á estos momentos, y una tercera registra los segundos 0, 2, 4 de un reloj inmediato (fig. 25). De esta suerte se obtiene la medida de la velocidad de la luz por la coincidencia de estos tres trazados independientes.

De una serie de 698 experimentos hechos en 1873 entre la Escuela politécnica y el monte Valeriano, separados por una distancia de 10,310 metros, dedujo M. Cornu que la velocidad de la luz en el vacío era de 298,500 kilómetros por segundo. En 1875 hizo otros 504 experimentos entre el Observatorio y la torre de Montlhery (distancia 23 kilómetros), los cuales dieron por resultado 300,400 kilómetros. El sabio físico calcula que este valor es exacto con solo 0,001 de diferencia.

## IV

### MEDICION DIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ.— MÉTODO DEL ESPEJO GIRATORIO DE FOUCAULT

Leon Foucault hizo de 1850 á 1862 muchos experimentos que le permitieron determinar directamente la velocidad de la luz. La cifra que obtuvo por resultado no difiere notablemente de la deducida por Fizeau. Procuremos dar una idea del medio de que se valió.

Acababa Wheatstone de averiguar cuál podria ser el límite mínimo de la velocidad de la electricidad por el método de los espejos giratorios, y Arago concibió la idea de valerse de este método, convenientemente modificado, no para medir la velocidad absoluta de la luz, sino para compararla en el agua y en el aire. Esta comparacion era de gran importancia, bajo el

(1) El disco empleado por M. Fizeau tenia su contorno dividido en 1,440 partes iguales, cada una de ellas por consiguiente de un cuarto de grado. Estaban vaciadas de dos en dos, de suerte que habia en total 720 dientes separados por espacios de la misma anchura que los dientes.

El contador marcó una velocidad de 12,67 vueltas por segundo en el momento del primer eclipse del punto luminoso. Entónces la velocidad de rotacion era tal que un diente pasaba á ocupar el puesto del intervalo vacío en un tiempo marcado por la fraccion de segundo

$$\frac{1}{1,440 \times 12,67} \text{ ó } \frac{1}{18,244}$$

Así pues, para franquear dos veces el intervalo comprendido entre las dos estaciones (es decir, 8,633m×2 ó 17,266 metros), la luz habia invertido la 18,244.ª parte de un segundo. Luego su velocidad en el aire en un segundo era igual á 17,266m×18,244 ó á 315,000 kilómetros. Pronto veremos que este primer resultado era algo excesivo.

punto de vista de las dos teorías de la luz que por aquel entónces tenian divididos á los hombres de ciencia. En efecto, segun la teoría de Newton ó de la *emision*, la luz debia propagarse más rápidamente en el agua que en el aire, debiendo suceder lo contrario si la teoría de las *ondulaciones* era la verdadera.

Para decidir entre ambas hipótesis era menester averiguar prácticamente cuál de las dos velocidades aventajaba á la otra. Arago planteó el principio del método que se deberia emplear, describió los aparatos propios para ponerlo por obra y hasta encargó al hábil mecánico Breguet la construccion de estos aparatos. Pero el ilustre secretario de la Academia de ciencias no pudo realizar su proyecto á causa de la cortedad de su vista, y entónces Fizeau y Leon Foucault, autorizados por Arago para poner en ejecucion sus propósitos, lograron casi al mismo tiempo el resultado apetecido, si bien modificando cada cual por su parte la disposicion de los instrumentos, y vieron que la luz se mueve con más rapidez en el aire que en el agua, lo cual era una nueva confirmacion de la verdad de la teoría de las ondas.

Este primer resultado era importantísimo bajo el punto de vista de la teoría; pero todavía no marcaba numéricamente el valor de la velocidad absoluta de la luz.

Véase cómo resolvió Leon Foucault esta segunda parte del problema. Copiamos de su Memoria la descripcion del aparato motor de que hizo uso, y la de los medios de que se valió para que un espejo, base de su experimento, tuviera una velocidad constante, así como para medirla.

«Digamos ante todo cómo se imprime al espejo una velocidad constante.

»Este espejo, de cristal azogado M, y de 14 milímetros de diámetro, está montado directamente sobre el eje AA de una pequeña turbina de aire (fig. 26), admirablemente construida por M. Froment; el aire lo suministra un fuelle de alta presion de M. Cavaillé-Coll, quien ha adquirido justo renombre como fabricante de órganos; y siendo esencial que la presion tenga una gran fijeza, al salir el aire del fuelle atraviesa un regulador ideado por M. Cavaillé y en el cual la presion no varía de $^1/_8$ de milímetro por $0^m,30$ de columna de agua. Así pues, al salir el aire por los orificios de la turbina representa una fuerza motriz notablemente constante, y por otro lado, al adquirir el espejo mayor rapidez no tarda en encontrar en el aire ambiente una resistencia que, para una veloci-

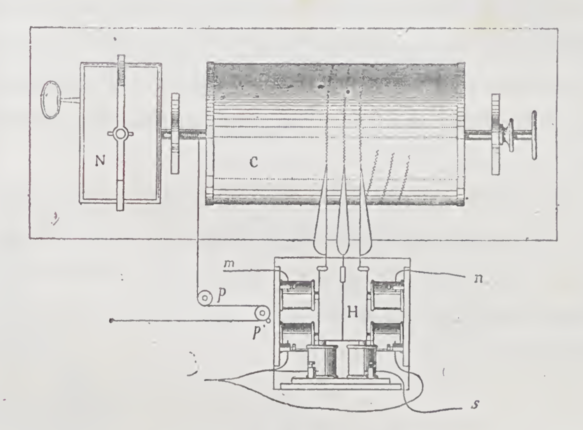


*Fig. 24.* —Aparato anotador de M. Cornu. Experimentos sobre la velocidad de la luz: C, cilindro anotador; H, carrito que lleva tres electro-imanes provistos de sus punzones; N, motor Foucault con muelle, que comunica el movimiento al anotador.

dad dada, es tambien perfectamente constante. El móvil, situado entre dos fuerzas contrarias que propenden á equilibrarse, no puede dejar de adquirir y conservar una velocidad uniforme.

»Restaba contar el número de vueltas, ó mejor dicho, imprimir á este móvil una veloci-

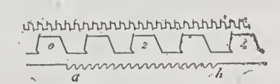


*Fig. 25.*— Diagrama del aparato anotador

dad determinada. Este problema ha sido completamente resuelto del modo siguiente:

»Entre el microscopio y la luna de reflexion parcial hay un disco circular cuyo borde, finamente dentado, intercepta en parte la imágen que se observa; el disco gira sobre sí mismo de un modo uniforme, de suerte que si la imágen brillase sin intermision, no se verian los dientes del borde del disco á causa de la uniformidad del movimiento; pero la imágen no es permanente, sino que resulta de una serie de apariciones discontinuas cuyo número es igual al de las revoluciones del espejo; y en el caso particular de que los dientes de la pantalla se sucedan tambien en el mismo número, la vista padece una ilusion fácil de explicar y que hace aparecer la denticulacion como si el disco no diese vueltas. Supongamos que este disco tiene *n* dientes en su circunferencia, que da una vuelta por segundo y que se pone en marcha

la turbina; si arreglando la salida del aire se mantiene la fijeza aparente de los dientes, se podrá tener por seguro que el espejo da efectivamente *n* vueltas por segundo.»

Operando en una distancia total de 20 metros, é imprimiendo al espejo giratorio una velocidad de 400 metros por segundo, Leon Foucault obtuvo en 1862 la cifra de 298,000 kilómetros por segundo como velocidad de la luz en el aire.

El sabio americano M. A. Michelson hizo en 1879 una serie de experimentos, modificando el método de Le[illegible] Foucault, obteniendo como medida de la velo[illegible]d de la luz 299,940 kilómetros por segundo.

## V

### VELOCIDAD DE LA LUZ.—COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR VARIOS MÉTODOS.

De los cálculos de Delambre resultó que la luz invierte 493 segundos en recorrer el radio medio de la órbita de la Tierra. Para deducir pues la velocidad real de la luz, por ejemplo, el número de kilómetros que cruza en un segundo, es preciso conocer el valor numérico de dicho radio, la distancia media del Sol á la Tierra, ó, si se prefiere, la paralaje del Sol.

Suponíase esta paralaje igual á 8",57, número deducido por el astrónomo Eulero de la discusion de las observaciones de los pasos de Vénus á mediados del siglo último. Posteriormente se han hecho nuevas investigaciones que han inducido á considerar sobrado escaso este valor, el cual se supone ahora en 8",86.

El primer valor de la paralaje solar nos da, para la velocidad de la luz, unos 310,000 kilómetros por segundo, cifra que difiere un tanto de la que dedujo M. Fizeau de sus primeros experimentos. Si por el contrario se adopta la paralaje de 8 ,86, dicha velocidad queda reducida á 299,000 kilómetros, que es, poco más ó ménos, el resultado obtenido en 1862 por M. Leon Foucault y en 1873 por M. Cornu. Tambien difiere muy poco del que este último físico obtuvo en 1875.

Partiendo de la constante de la aberracion, que segun los últimos trabajos de Struve es igual á 20",445, se puede averiguar tambien la velocidad absoluta de la luz. Pero, así como al tratarse de los satélites de Júpiter, es preciso suponer conocida la paralaje solar. La de 8",57 da 308,000 kilómetros, y la de 8",86, 297,600.

Claro está que se podria resolver el problema en sentido inverso, es decir, tomando por punto de partida la velocidad absoluta de la luz medida directamente en la superficie de la Tierra, ya por el método de Fizeau ó bien por el de Foucault, y basándose luégo en los datos astronómicos de la ecuacion de la luz (calculada por Delambre) ó de la aberracion (calculada por Struve), deducir por el cálculo el valor de la paralaje solar.

¿Hasta qué punto y con cuánta aproximacion se han resuelto tan interesantes problemas? No nos incumbe decirlo; pero las cifras consignadas demuestran que no distaremos mucho de la verdad considerando la velocidad de la luz igual á 300,000 kilómetros por segundo, número que corresponde á la paralaje 8",81.

Adoptemos interinamente los 300,000 kilómetros, y comparemos esta velocidad con las de varios cuerpos y agentes físicos.

El sonido se propaga con una velocidad de $330^{m},7$ en el aire á 0°, y de $1,435^{m}$ en el agua á 15°; por consiguiente la luz se mueve 910,000 veces más de prisa que el sonido en el aire, y 209,000 más que éste en el agua. Una bala de cañon de 12 kilógramos, disparada con una carga de pólvora de 6 kilógramos, recorre 500 metros en el primer segundo, velocidad 600,000 veces menor que la de la luz. A causa del movimiento de rotacion de la Tierra, un punto del ecuador avanza 465 metros de oeste á este en un segundo; la luz tiene un movimiento de propagacion 645,000 veces más rápido, y por último se mueve 10,186 veces más de prisa que nuestro mismo planeta, el cual recorre por término medio 29,45 kilómetros por segundo sobre su órbita.

Unicamente la velocidad de propagacion de la electricidad es comparable con la de la luz, sólo que aún no se ha determinado, ni con mucho, con la misma precision, lo cual consiste en las variables condiciones del movimiento en los cuerpos conductores. Por ejemplo Wheatstone calculó que la velocidad de la electricidad en un alambre de cobre era de 420,000 kilómetros: MM. Fizeau y Gounelle la calcularon

en 1.800,000; Walker y Mitchel obtuvieron 30,000 y 45,000 como medida de la velocidad de la electricidad en los alambres de hierro de los telégrafos americanos. En otras condiciones, esta velocidad puede ser menor de lo que indican las últimas cifras.

La excesiva rapidez de la propagacion de la luz ha hecho que se escoja por unidad de las distancias sidéreas el espacio enorme que recorre la luz en un año, espacio que no baja de 9.500,000.000,000 de kilómetros. Así, cuando los astrónomos quieren expresar la distancia que separa las estrellas de nuestro planeta, dicen que la luz invierte *tantos años* en recorrer esta distancia. Por ejemplo, la estrella *alfa* del Centauro dista de nosotros tres años y medio de luz; Sirio, veintiun años; la Cabra, setenta. Desde las estrellas más pequeñas visibles á la simple

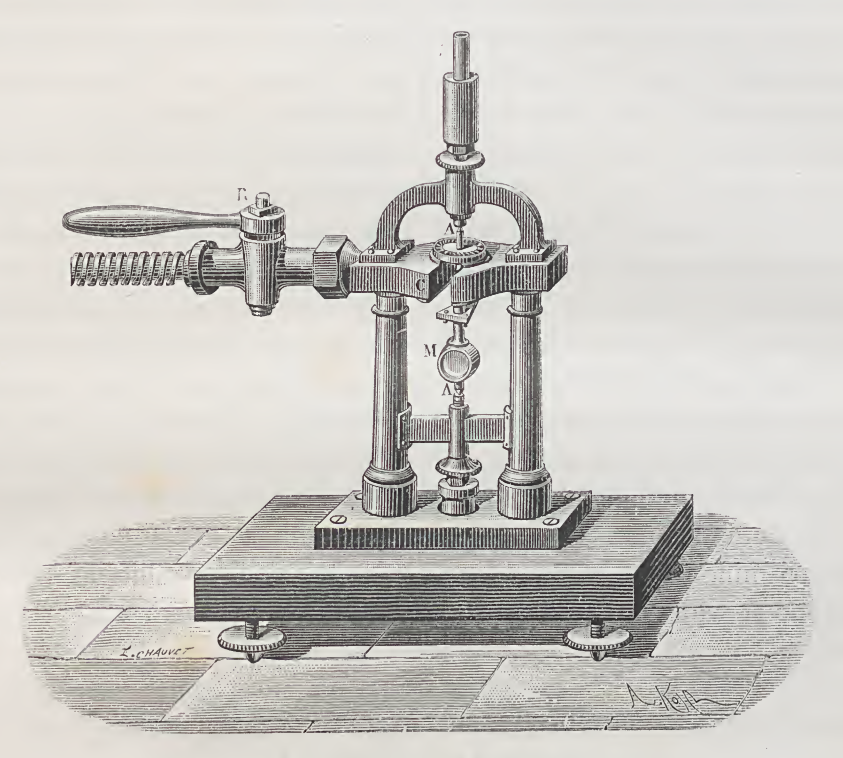



*Fig. 25.*— Turbina que imprime el movimiento al espejo

vista, la luz tarda 225 años en llegar hasta nosotros y emplea cerca de 600 para cruzar la distancia que nos separa de una estrella de novena magnitud.

Del hecho de que la luz no se propaga instantáneamente resulta una consecuencia muy sencilla, y es que para llegar hasta nosotros necesita tanto más tiempo cuanto más remoto se halla el foco de donde emana, por cuya causa jamás vemos el cielo tal cual en sí es.

En el momento en que fijamos la mirada en una region sembrada de estrellas, las diferentes ondas luminosas que, hiriendo nuestra retina, nos producen otras tantas sensaciones distintas pareciendo que nos atestiguan la existencia actual de las estrellas de que emanan, son efectivamente mensajeros partidos de esos apartados mundos, pero mensajeros que han salido de ellos há ya mucho tiempo, años, siglos, millares de años quizás. Las noticias que nos traen pertenecen á un tiempo pasado y nos informan, no del estado en que se encuentran las estrellas observadas, sino del que tenian al partir cada una de las ondas luminosas. Por esta razon ha podido decir Arago:

«El aspecto del cielo en un momento dado nos refiere, por decirlo así, la historia antigua de los astros;» y por la misma causa hemos dicho en otra obra:

«No vemos el cielo *tal como es*, sino como era; pero no como era en una época, sino en muchas épocas á la vez, en una infinidad de épocas dadas; de suerte que cada estrella podria anotarse con una fecha particular de la historia del cielo. Aquí, presenciamos el espectáculo de una nebulosa contemporánea de la época de Homero; allá, ese sol nos envia destellos que datan del tiempo de Pericles; la luz de la

Cabra está en marcha desde nuestra gran epopeya revolucionaria de 1792 (esto lo escribíamos en 1862; hoy deberíamos decir desde los primeros años del siglo XIX), y así hasta lo infinito. ¡Espectáculo extraño, que abisma el pensamiento en la rareza de un hecho en el cual se confunden á la vez, sin contradiccion para la razon, los tiempos y las distancias!»

Es tal la importancia filosófica de un caso que parece tan nuevo cuando se piensa en él por vez primera, que para terminar este artículo, citaremos las discretas líneas que Humboldt ha dedicado en su *Cosmos* á la misma idea.

Al hablar de los fenómenos de las estrellas efímeras, dicho autor añade:

«Todos estos hechos corresponden en realidad á épocas anteriores á aquellas en que los fenómenos de la luz los anunciaron á los habitantes de la Tierra; son como voces de lo pasado que llegan hasta nosotros. Háse dicho con verdad que, gracias á nuestros poderosos telescopios, podemos penetrar á la vez en el tiempo y en el espacio. Y en efecto, medimos el uno por el otro: una hora de camino equivale para la luz á un trayecto de 110 millones de miriámetros. Al paso que Hesiodo se valia en su *Teogonía* de la caida de los cuerpos para representar las dimensiones del universo («nueve dias y nueve noches tardó en caer el yunque de bronce desde el cielo á la tierra»), Herschel estimaba que la luz emitida por las últimas nebulosas visibles todavía en su telescopio de 40 piés debia invertir cerca de dos millones de años en llegar hasta nosotros. Así es que muchos fenómenos deben haber desaparecido largo tiempo ántes de que hayamos podido percibirlos; y há ya mucho tiempo que habrán ocurrido cambios que no vemos todavía. Los fenómenos celestes no son simultáneos sino en apariencia, y áun cuando se quisiera colocar más cerca de nosotros las tenues manchas de nebulosas ó los cúmulos de estrellas, áun cuando se redujera á menor número el número de años que miden y marcan sus distancias, no por eso dejaria de ser la luz que han emitido y que llega hoy á nuestra vista, en virtud de las leyes de propagacion, el testimonio más antiguo de la existencia de la materia. Así es como la ciencia conduce al espíritu desde las más sencillas premisas á las ideas más elevadas, abriéndole esos campos surcados por la luz en «que germinan millones de mundos como la yerba de la noche.»

# CAPÍTULO IV

## REFLEXION DE LA LUZ

### I

#### CONDICIONES DE VISIBILIDAD DE LOS CUERPOS—FOCOS LUMINOSOS DIRECTOS

¿Cuáles son las condiciones exteriores de visibilidad de los cuerpos?

Consideremos ante todo un foco luminoso propiamente dicho. Si el medio interpuesto entre este foco y la vista es trasparente y además homogéneo, puede decirse que la visibilidad es directa; y en efecto, el haz luminoso emanado de cada punto del foco sigue en este caso una línea recta. Esto resulta de la propagacion rectilínea de la luz, en la hipótesis de que el medio atravesado por ella sea homogéneo. Reconstruyendo geométricamente las líneas rectas divergentes que constituyen los varios haces, se volveria á encontrar en su punto de convergencia el punto luminoso mismo.

Pero en breve veremos que no sucede lo propio cuando el espacio comprendido entre el ojo y el foco de luz está ocupado por uno ó muchos medios diferentes, aunque separadamente homogéneos. El camino seguido por cada haz es siempre rectilíneo en cada medio, mas por lo general sufre cierta desviacion al pasar de uno á otro: el curso total, compuesto de una serie de líneas rectas, es entónces una línea mixta, cuyo

último elemento marcará la direccion en que el ojo verá el punto luminoso. La imágen del foco resulta pues situada de distinto modo que cuando sólo hay un medio trasparente; habrá sufrido una desviacion, y á este fenómeno es al que se da el nombre de *refraccion de la luz*.

Aquí suponemos que los medios atravesados por la luz están dotados de trasparencia absoluta, en cuya hipótesis únicamente es visible el foco, pues el ojo no percibe la materia ó sustancia de que se compone el medio, y ni esta es siquiera visible.

Mas en realidad, y segun dejamos dicho, la trasparencia absoluta no existe en la naturaleza, ó á lo sumo se la puede suponer en los espacios interplanetarios que no son inmediatamente accesibles á la observacion. Los medios que conocemos, sólidos, líquidos y gaseosos, como el cristal, el agua y el aire, tienen tan sólo una trasparencia relativa: absorben en parte la luz que los atraviesa, de lo cual resulta para ellos una iluminacion más ó ménos intensa, que crece con su espesor, y á menudo tambien cierto tono ó coloracion, que siendo perceptible para nuestra vista, nos los hace visibles. La luz recibida de esta suerte, y que debemos distinguir de la que hace visible al foco, se llama luz trasmitida. El medio percibido es visible por trasparencia: de los que se hallan dotados de esta condicion en mayor grado se pasa á los traslúcidos y luégo á los cuerpos ó medios opacos, por grados insensibles, por decirlo así. La luz de un foco se difunde así cada vez más por el interior del medio, de suerte que aquel acaba por no ser ya visible, al paso que los diferentes puntos del medio penetrados por su luz son, por el contrario, los únicos que la vista percibe. Por tal manera se llega á la opacidad tan luégo como la absorcion es completa, ó por lo ménos desde que la intensidad de la luz trasmitida es bastante débil para no causar impresion apreciable en el ojo.

Tales son las condiciones de visibilidad de un foco luminoso, es decir, de un cuerpo que es luminoso por sí mismo, ó bien por incandescencia ó de otro modo cualquiera. Veamos ahora lo que son respecto de los cuerpos que no son focos propiamente dichos.

En este caso, los cuerpos no son visibles sino cuando están iluminados, es decir, cuando su superficie recibe cierta cantidad de luz de cualquier foco. La observacion demuestra entónces que segun la naturaleza del cuerpo y el estado de su superficie, una parte mayor ó menor de la luz recibida vuelve al medio del que emana, despues de sufrir cierta desviacion en su direccion primitiva. Esta variacion de curso, este retroceso de los rayos luminosos sobre sí mismos ó siguiendo direcciones inmediatas, pero en el mismo medio del que habian partido, es lo que constituye el fenómeno de la *reflexion de la luz*.

Presentemos un ejemplo familiar. Pongamos una hoja de papel blanco y mate á la luz del dia, ó á la de una lámpara ó una bujía, y veremos desde luégo todos los puntos de la superficie del papel, cada uno de los cuales resultará iluminado, ó en otros términos, hará para nuestra vista las veces de un foco luminoso; si la masa de aire ó el medio diáfano que separa el papel del ojo es homogéneo, la marcha de los rayos luminosos que emanan del punto será rectilínea, lo propio que la seguida por el haz que, desde el foco, ha venido á dar en dicho punto. Apartando un poco la vista, se sigue viendo el punto de la misma manera; luégo irradia en todos sentidos, y la única diferencia que se advierte es un cambio de intensidad que depende de la inclinacion de la superficie con respecto á la línea recta que sigue la luz enviada al ojo.

Sustituyamos ahora la hoja de papel por cualquier otro objeto, pero de superficie mate tambien, es decir, que no sea brillante ni tersa. Este objeto será visible del propio modo. El color, la intensidad de la luz podrán variar considerablemente, pero con la circunstancia característica de que la luz estará siempre reflejada por cada punto en el medio diafano circundante, y esto en todas las direcciones posibles. El ojo, situado en cualquier posicion, seguirá viendo cada punto de la superficie del cuerpo, con tal de que no se interponga ningun obstáculo opaco en el trayecto rectilíneo de los rayos reflejados.

La luz reflejada de esta suerte por los cuerpos mates, rugosos, de superficie irregular, adquiere más particularmente el nombre de *luz difusa*.

Pero las cosas sucederán de distinto modo si ponemos delante del foco de luz, no ya una superficie mate, sino otra bruñida, una placa metálica, ó si se quiere la superficie de

un baño de azogue bien purificado. Nadie ignora que si se quiere hacer llegar á la vista la luz reflejada por uno de los puntos de la superficie bruñida, se le debe colocar en una posicion particular, que varía con la del punto. La reflexion no resulta ya en todas direcciones alrededor de este punto, como sucede con la hoja de papel. Hay además otra diferencia esencial, consecuencia de la primera, y es que no toda la superficie del baño de azogue aparece iluminada á la vista, aunque esta no varie de posicion; sólo lo está una porcion limitada de ella, y cuya forma aparente es tal, que reproduce idénticamente, por decirlo así, la imágen del foco, la llama de la bujía ó de la lámpara. La porcion de la superficie que rodea esta imágen es comparativamente oscura, ó por lo ménos no hace más que reflejar del mismo modo la imágen de los objetos más ó ménos alumbrados que se hallan opuestos al baño de mercurio.

Así pues, hablando con propiedad, no es la superficie de los cuerpos bruñidos la que aparece visible cuando estos reciben la luz emanada de cualquier foco, sino más bien el foco mismo y los objetos ilnminados por él. Esta superficie recibe entónces el nombre de espejo (1).

Por esta razon es preciso distinguir de la reflexion irregular ó difusa la reflexion especial de los cuerpos cuya superficie es más ó ménos tersa; esta se llama *reflexion especular* (del latin *speculum*, espejo); la primera toma el nombre particular de *difusion.* Vamos á estudiar primeramente los fenómenos de reflexion especular, por ser la ley que los rige muy sencilla y susceptible de una definicion rigurosamente geométrica.

## II

LEYES DE LA REFLEXION ESPECULAR.—IGUALDAD DE LOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA Y REFLEXION DE LOS RAYOS LUMINOSOS

Mucho ántes de que la industria humana, excitada por las necesidades de la higiene, del lujo y de la coquetería, hubiera pensado en bruñir los metales y el cristal, y en convertir sus superficies brillantes en otros tantos espejos y lunas, la naturaleza nos presentaba ya ejemplos del fenómeno al que han dado los físicos el nombre de *reflexion especular de la luz.* La superficie de un agua tranquila y límpida, de un estanque ó de un lago, reproduce la imágen fiel del paisaje que la rodea, la bóveda azul del firmamento, las nubes, el sol ó las estrellas, los árboles, las rocas, los séres animados que se pasean por sus orillas ó navegan por la superficie de la sábana líquida, ¿y acaso no es este el modelo en grande escala que las artes industriales no han hecho más que copiar, y que hubiera bastado para estudiar, no diré cómoda, pero sí fielmente, la marcha que sigue la luz, cuando, partiendo de los focos luminosos ó de los objetos alumbrados, viene á rebotar en la superficie de los cuerpos? Pero como no sentimos la necesidad de estudiar sino despues de la de admirar ó disfrutar, el descubrimiento de las leyes de la reflexion de la luz ha debido ser muy posterior á la imitacion de los fenómenos que acabamos de describir.

Veamos pues qué leyes son estas, y ocupémonos ante todo de la marcha seguida por un rayo luminoso que se refleja en un punto de una superficie plana y tersa. Suponiendo como siempre homogéneo el medio á donde va á parar el rayo, compréndese que despues de su reflexion se propagará en línea recta como ántes. Trátase pues de determinar la direccion precisa del rayo reflejado.

La primera determinacion podria obtenerse por medio de la cámara oscura, áun cuando á decir verdad su precision no seria mucha.

Y en efecto, hemos visto que un rayo de luz solar que penetra por el agujero de un postigo marca su direccion en el aire de la habitacion iluminando los corpúsculos que siempre hay en suspension en él. Supongamos que se coloca entónces un plano de metal bruñido ó un pedazo de cristal en el trayecto del haz incidentes. Sera fácil medir el ángulo que forma este haz con el plano del espejo; y como al reflejarse la luz marcará en el aire y del propio modo que el haz incidente, su paso y su direccion, se medirá tambien el ángulo de inclinacion que forman los rayos reflejados con el espejo.

---

(1) Si se hacen en el interior de una habitacion oscura los dos experimentos que acabamos de describir, hé aquí lo que se observará. La hoja de papel ó el objeto mate de superficie rugosa que se coloque en el trayecto del haz luminoso solar, dará una imágen del sol que será visible desde todos los puntos de la estancia. Por el contrario, el espejo, la placa bruñida ó la superficie de azogue quedará comparativamente oscura ó invisible, y para ver la imágen del Sol, el observador deberá situarse en una direccion especial, en cuyo caso dicha imágen aparecerá proyectada ó reflejada en esta misma direccion, en una pared opuesta de la cámara oscura.

De este modo se obtendrán fácil, pero sólo aproximadamente las dos leyes de la reflexion especular que vamos á enunciar describiendo un medio más preciso de comprobacion práctica.

Tomemos como superficie reflectora un baño de azogue y por objeto luminoso una estrella cuyos rayos pueden considerarse como rigurosamente paralelos en atencion á la inmensa distancia que los separa de la superficie de la Tierra.

Examinemos uno de estos rayos SI (fig. 26), que toca en el punto I de la superficie del baño de azogue. IN es la vertical del mismo punto ó la normal á la superficie reflectora, y el ángulo SIN se llama *ángulo de incidencia.* El rayo SI se refleja siguiendo la direccion IR, de modo que colocando el ojo en esta direccion, se verá la imágen de la estrella en el baño de azogue. El ángulo que forma el rayo reflejado con la vertical IN es lo que se llama *ángulo de reflexion,* en vista de lo cual es ya fácil comprobar las dos leyes siguientes:

1.° *El rayo incidente, el reflejado y la vertical al punto de incidencia están en un mismo plano*; luego este plano es siempre perpendicular á la superficie reflectora;

2.° *El ángulo de reflexion es igual al de incidencia.*

Se puede hacer la comprobacion de ambas leyes con el instrumento que indica la fig. 26; el cual se compone de un círculo metálico dividido y puesto sobre un pié y de dos anteojos fijos en el centro del limbo, los cuales pueden girar en su plano; este círculo está colocado en una posicion tal, que el limbo sea perfectamente vertical. Con uno de los anteojos, y haciendo girar de modo oportuno el limbo sobre su eje vertical, se enfila el baño de azogue de modo que se vea la imágen reflejada de la estrella; en este momento coincide el rayo reflejado con el eje del anteojo y el ángulo N' I' R' es igual al ángulo N I R, es decir, al ángulo de reflexion. Si utilizando ahora el otro anteojo lo asestamos directamente á la estrella, se demuestra que no hay que variar de posicion el instrumento, ó hablando con más exactitud, que el plano del limbo, en su posicion actual, contiene el rayo visual emanado de la estrella. En otros términos, el rayo incidente S' I' se halla en el mismo plano vertical que el reflejado, lo que prueba la primera ley, puesto que S I es paralela á S' I'. Además, el ángulo S' I' N' es rigurosamente igual al de incidencia, toda vez que los lados de estos ángulos son paralelos, y como al contar en el limbo en grados, minutos y segundos la posicion de ambos anteojos se observa que los arcos comprendidos entre la vertical I' N' y sus direcciones son iguales entre sí, resulta que hay igualdad entre los ángulos de reflexion y de incidencia, con lo cual queda demostrada la segunda ley.

Sea cualquiera la posicion de la estrella enfilada ó su altura sobre el horizonte, los resultados de la observacion serán los mismos, y el fenómeno de reflexion obedecerá á las mismas leyes. Así pues, si el ángulo de incidencia es nulo, ó en otros términos, si el rayo luminoso toca perpendicularmente la superficie reflectora, el de reflexion será nulo tambien, pues la marcha seguida á su regreso por el rayo coincide con la del rayo incidente. La luz retrocede sobre sus propios pasos en la direccion misma en que se habia propagado primeramente.

## III

### IMÁGENES PRODUCIDAS POR LA REFLEXION DE LA LUZ EN LOS ESPEJOS PLANOS.

La reflexion de la luz en la superficie de los espejos da orígen á la formacion de imágenes, es decir, á la reproduccion, con respecto á los ojos, de apariencias semejantes á los objetos, ya luminosos por sí mismos ó ya simplemente alumbrados, que están situados de modo que irradien en dicha superficie. Es un caso práctico; pero tambien una sencilla consecuencia de las leyes de la reflexion especular.

Al decir que las imágenes son semejantes á los objetos, suponemos que la superficie reflectora sea perfectamente plana; porque los espejos cuya superficie tiene una curvatura esférica, cilíndrica, cónica ó parabólica, alteran por lo comun, ya en su forma, ó ya en sus dimensiones, los objetos que se reflejan en ellos; y si la curvatura es irregular, es posible que la imágen y el objeto no tengan ya semejanza alguna. Con todo, la ley de la formacion de esas imágenes es siempre consecuencia directa de las leyes de reflexion especular, y puede deducirse geo-

métricamente de la ley de formacion de las imágenes en los espejos planos. Empezaremos pues por estudiar esta última ley, y demostraremos que los resultados de la observacion son idénticos á los que nos da el raciocinio. Pero ántes, digamos una palabra acerca de las diferentes clases de espejos.

Se debe considerar como *espejo plano* toda superficie reflectora plana y tersa, ya sea sólida, líquida ó gaseosa la materia que la forma; mas ante todo sólo nos ocuparemos de los fenómenos de reflexion en la superficie exterior, distincion á la verdad inútil si se trata de espejos planos constituidos por una placa metálica bruñida todo lo posible por un procedimiento industrial cualquiera, ó tambien por otro cuerpo opaco susceptible de pulimento, como el mármol, la madera lisa y barnizada, etc. Los espejos propiamente dichos consisten en una luna de caras paralelas en cuya superficie posterior se ha dado una delgada capa de una amalgama de estaño (aleacion de estaño y azogue). La ventaja de estos espejos está en la inalterabilidad de la capa metálica reflectora protegida por el cristal, al paso que los espejos metálicos (acero, bronce, plata) se empañan rápidamente por la accion oxidante del aire, del vapor de agua ó de los gases que siempre hay en el aire. Pero los espejos azogados tienen otro inconveniente, el de que dan imágenes dobles y áun múltiples de los objetos, y que se confunden en parte entre sí, careciendo por lo tanto de la limpieza que presenta una sola imágen. La superficie exterior y tersa del cristal es á su vez un espejo que refleja una parte de la luz incidente, otra parte se difunde por dicha superficie, y la que llega á la capa azogada despues de haber sido refractada una vez en el interior del cristal, se refracta y refleja otra vez, de suerte que solamente una fraccion de la luz total llega al ojo para producir en él la sensacion de la imágen principal. Más adelante tendremos ocasion de tratar de nuevo de estas imágenes múltiples.

Las superficies de los líquidos en reposo forman tambien espejos naturales, y por esto un baño de azogue (líquido no trasparente) puede asimilarse á un espejo metálico. El agua y los demás líquidos límpidos envian á los ojos una escasa porcion de la luz incidente, á no ser que el ángulo que forman los rayos con la superficie sea muy pequeño. El resto penetra en el interior del líquido refractándose en él, quedando absorbido en su mayor parte tan luégo como el espesor es un poco considerable.

Las superficies de separacion de los gases de densidades desiguales son tambien reflectoras, y ya veremos que ciertos fenómenos naturales se explican en parte por esta propiedad.

Pasemos á las imágenes dadas por un espejo plano, prescindiendo de la clase de materia que lo constituye.

La observacion diaria más elemental nos muestra en una luna ó espejo la imágen exacta del objeto puesto ante él. Las dimensiones parecen identicas á las del objeto, ó mejor dicho, estas dimensiones son las mismas con que apareceria el objeto si estuviera situado detrás del espejo, á una distancia de su plano precisamente igual á la que ocupa delante del espejo. Además, las posiciones relativas de las diferentes partes de este ó de los objetos entre sí son lo contrario de las posiciones reales: la derecha de la imágen es la izquierda del objeto y recíprocamente. Estas diferentes condiciones se resumen en una ley cuyo enunciado geométrico es muy sencillo:

*En todo espejo plano, la imágen es simétrica del objeto.*

Consideremos un haz luminoso enviado por la punta de la llama de una bujía (fig. 27) sobre un espejo plano. Los rayos de que se compone divergen en todos sentidos despues de reflejarse en la superficie del espejo; pero la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexion hace que todos los rayos se reunan detrás del espejo en un mismo punto, simétricamente situado respecto del plano del espejo y del extremo de la bujía de donde emana el haz. En una palabra, este último punto y su imágen están situados á igual distancia del plano del espejo y en la perpendicular á este plano. Para el ojo que recibe el haz divergente, parecerá que el objeto luminoso está situado en el punto de convergencia, y en él verá la imágen. Sea, pues, la que quiera la posicion del observador delante del espejo, la de la imágen no variará, aunque parezca que ocupa puntos distintos en el espejo.

El extremo inferior de la bujía formará su

imágen del propio modo, y lo mismo ocurre con todos los puntos intermedios, de donde se deduce que la imágen de un objeto luminoso cualquiera estará formada, punto por punto, por todas las imágenes parciales simétricamente colocadas detrás del espejo, á distancias de su superficie iguales á las distancias particulares de cada uno de los puntos del objeto. Vése claramente por esto que la imágen producida por la reflexion de la luz que un objeto envia á la superficie de un espejo plano, no tiene nada de objetivo ó real: y esto es lo que se llama imágen *virtual*, forma ó representacion que no existe más que para la vista. Pronto veremos en qué circunstancias pueden formarse por vía de reflexion *imágenes reales* de los objetos.

Un espejo plano puede reproducir la imágen de un objeto, sin que para ello sea preciso que éste se halle enfrente de aquél: bastará que el ojo esté colocado de modo que reciba los rayos reflejados, esto es, en el espacio divergente QMM'P (fig. 28) comprendido entre los rayos extremos emanados del objeto que van á reflejarse en el contorno del espejo. Este espacio constituye el *campo* del espejo con relacion al objeto.

Es muy raro que la forma y el color de los objetos reflejados no sufran alguna alteracion en los espejos ordinarios, lo cual consiste en que es muy difícil conseguir una tersura perfecta y superficies rigurosamente planas. La luz difusa se mezcla entónces con la reflejada especularmente, y la comunica una coloracion propia de la sustancia de que está formado el espejo. En las lunas azogadas se observa tambien que los objetos forman una imágen doble: una, mucho más débil, la de la superficie exterior del espejo; otra, que es la más brillante, el espejo propiamente dicho, es decir, la superficie interna del azogue. Los espejos metálicos no tienen este inconveniente, pero ya hemos visto que presentan otros mayores: la cantidad de luz que reflejan es ménos viva y su superficie se empaña rápidamente al contacto del aire.

## IV

### IMÁGENES MÚLTIPLES PRODUCIDAS POR COMBINACIONES DE ESPEJOS

Colocando dos ó muchos espejos planos de varios modos resultan efectos singulares, ocasionados por las reflexiones múltiples que se producen de uno á otro espejo.

El más sencillo de estos efectos es el que dan dos espejos planos paralelos. Un objeto luminoso interpuesto entre ambos da orígen en cada uno de ellos á una primera imágen que convirtiéndose á su vez en objeto luminoso para los demás espejos respectivamente,—ó que por lo ménos puede ser considerado como tal á causa de las leyes de la reflexion,—engendra dos nuevas imágenes más lejanas que las primeras. Estas forman á su vez otras nuevas, y así indefinidamente, de suerte que el ojo situado convenientemente ve una infinidad de imágenes que en realidad son cada vez más débiles, á causa de las pérdidas que hacen sufrir á la luz estas reflexiones sucesivas. Fácil es observar dichos efectos en una sala donde haya dos espejos paralelos. Las dos series de imágenes se confunden en ellos fácilmente cuando se trata de un punto luminoso, pero si se tiene empeño en distinguirlas, basta mirar un objeto cuyas caras sean de colores ó formas diferentes. Así por ejemplo, á una persona situada entre los dos espejos y delante de uno de ellos se la verá alternativamente de frente ó de espalda en cada uno de ellos.

Dos espejos planos que formen ángulo dan imágenes cuyo número es limitado y depende de la dimension de la abertura de dicho ángulo; pero todas se hallan situadas en un círculo que tiene por centro un punto de la línea de interseccion de los espejos y por radio la distancia del punto luminoso. Las figuras 29 y 30 reproducen las tres imágenes formadas por dos espejos inclinados 90°. En las dos figuras siguientes vése cómo se eleva el número de imágenes á cinco ó siete, segun que los dos espejos estén inclinados 60° ó 45°.

El *espejo mágico* no es más que una combinacion de dos espejos planos inclinados de modo que reflejan las imágenes de los objetos separados por algun obstáculo de la vista del espectador. Se le ha utilizado con el nombre de *polemoscopio* para observar en un asedio los movimientos exteriores del enemigo estando el observador resguardado detrás de un parapeto. El polemoscopio representado en la fig. 31 está formado sencillamente por dos espejos

paralelos, inclinados 45° con relacion al horizonte y que pueden subir y bajar por dos correderas. El más elevado da frente á la region que desea explorar el observador, reproduciéndose en el más bajo la imágen de esta region, cuya imágen llega así al ojo despues de dos reflexiones sucesivas.

Hoy se da el nombre de espejos mágicos á unos espejos de orígen japonés ó chino que describiremos al tratar de las *Aplicaciones de la óptica.*

Las reflexiones múltiples entre los espejos inclinados han sugerido la construccion de varios instrumentos ó aparatos, entre los cuales haremos mencion del *Kaleidoscopio,* inventado por Brewster.

Colócanse en un tubo de carton tres tiras de espejo de modo que formen un prisma equilátero, cuya base está cerrada por dos plaquitas paralelas, una de ellas de cristal trasparente y la otra de cristal raspado, entre las cuales se colocan objetos pequeños, como por ejemplo, pedacitos de cristal de varios colores. Mirando por el extremo menor de esta especie de anteojo, se ven directamente estos trozos de cristal, cuyas múltiples imágenes se forman por reflexion en los tres espejos, resultando de aquí figuras irregularmente dispuestas que se pueden variar como se quiera, para lo cual basta dar vueltas al instrumento sobre su eje haciendo así que cambien de posicion los fragmentos coloreados (fig. 32).

En el Kaleidoscopio primitivo de Brewster sólo habia dos espejos, dándose por lo regular el nombre de *caja catóptrica* al instrumento que contiene tres ó más.

Hace pocos años se ponia en el muelle del Louvre un individuo que enseñaba á los espectadores asombrados la fachada del Instituto á través de un enorme adoquin. El *anteojo mágico* que de tal suerte permitia á los ojos ver al través de los cuerpos opacos se componia de dos tubos separados por el adoquin; pero estos dos tubos estaban reunidos por otro doblemente acodado que contenia cuatro espejos planos inclinados 45°, como se ve en la fig. 33, y por consiguiente los rayos luminosos podian seguir esta línea mixta y salvar el obstáculo hasta llegar al ojo.

---

## V

### IMÁGENES EN LOS ESPEJOS CURVOS.—ESPEJOS ESFÉRICOS CÓNCAVOS Y CONVEXOS

Cuando la luz, en vez de reflejarse en una superficie plana, cae sobre una superficie curva pulimentada, las leyes de su reflexion continúan siendo las mismas para cada punto del espejo, es decir, que los ángulos de reflexion y de incidencia son siempre iguales á uno y otro lado de la perpendicular al plano tangente á este punto, ó como se dice, de la normal á la superficie del punto de incidencia; además, el rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano. Pero la curvatura de la superficie modifica la convergencia ó divergencia de los haces luminosos que despues de la reflexion vienen á herir el ojo; esto da orígen á fenómenos particulares de los objetos luminosos y de la formacion de las imágenes, cuyas distancias y po siciones varían con la forma de los espejos y segun las dimensiones y distancias de los objetos.

Estudiemos primeramente los fenómenos de esta clase originados por la reflexion de la luz en la superficie de los espejos de forma esférica.

Una esfera metálica hueca, en la cual se corte por un plano un casquete de cierta extension, da un espejo esférico *cóncavo,* si la superficie cóncava es la pulimentada, y *convexo* si lo es la superficie exterior. Si el fragmento esférico es un trozo de cristal azogado, la capa de azogue es exterior para un espejo cóncavo, é interior para uno convexo. Pero ya hemos indicado por qué es preferible emplear los espejos de metal ó de cualquier otra sustancia opaca y bruñida para la observacion de los fenómenos. No hablaremos por tanto de los demás, que no diferirian de los primeros sino por la produccion de imágenes múltiples, acerca de lo cual bastará recordar lo anteriormente expuesto sobre las imágenes múltiples producidas por las dos superficies reflectoras de las lunas azogadas.

Veamos lo que sucede cuando se presenta un objeto luminoso, verbigracia la llama de una bujía, á diferentes distancias de un espejo cóncavo. En estos experimentos supondremos que se coloca el punto luminoso en el *eje de figura* del espejo, es decir, en la línea indefinida que reune el centro de la esfera á la cual

pertenece con el punto medio ó vértice del casquete esférico.

Coloquemos ante todo la bujía á una distancia del espejo algo mayor que el radio de curvatura. Mediante una pantalla traslúcida que reciba los rayos reflejados será fácil ver que se forma una imágen invertida del objeto y más pequeña que él, en un punto del eje comprendido entre el centro de la esfera y la mitad del radio (fig. 37). Alejando del espejo el punto luminoso, será preciso para recibir la imágen acercar progresivamente la pantalla al punto llamado foco principal del espejo (pronto veremos por qué) y entónces se advierte que la imágen, siempre invertida, disminuye cada vez más. Si se acerca de nuevo la bujía por la misma línea seguida al alejarla, esto es, desde su posicion actual hácia el centro, se observa

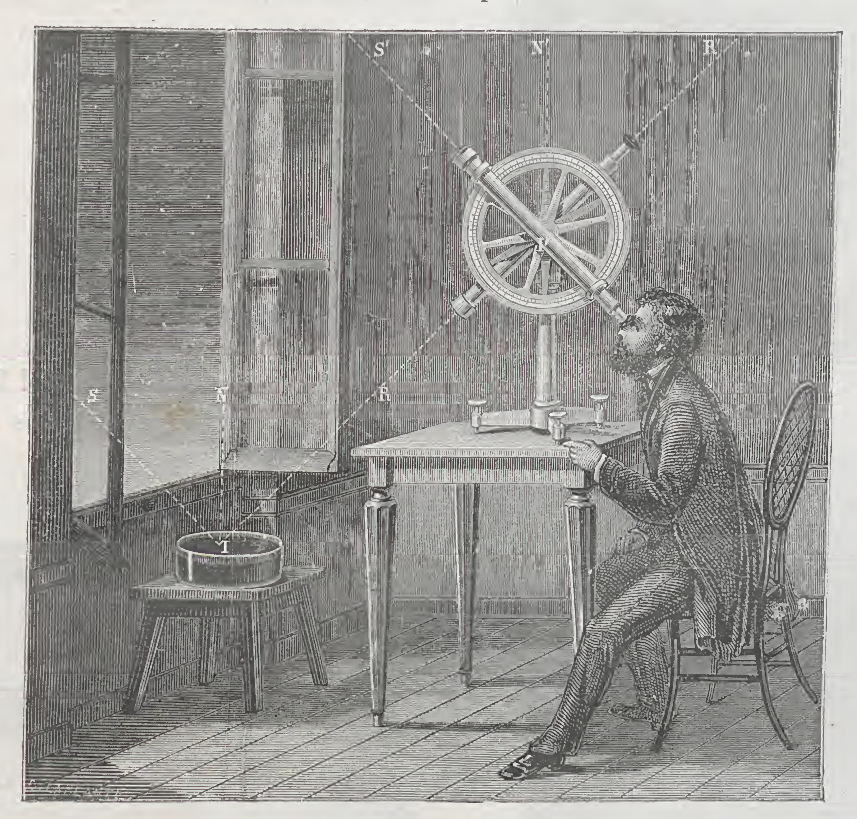



*Fig. 26.*— Estudio experimental de las leyes de la reflexion de la luz

que la imágen, siempre invertida y más pequeña que el objeto, va creciendo más y más conforme se aproxima al centro. Si la bujía llega hasta éste, la imágen llega al propio tiempo, y se confunde con ella en posicion y en tamaño.

Prosigamos ahora acercando la bujía al espejo, y veremos que la imágen pasa más allá del centro, y se aleja cada vez más de él aumentando sin cesar y siempre invertida (fig. 38). A medida que el objeto se acerca al foco principal, la imágen crece alejándose por el eje, pero más difusa, y en breve no es ya posible recibirla en la pantalla. Cuando la bujía llega al foco, la imágen se ha disipado completamente.

Hasta aquí, la imágen del objeto luminoso ha sido siempre real, es decir, que existen realmente en el aire, en el punto en que se forma, haces luminosos cuya reunion reproduce materialmente, por decirlo así, la forma y el color del objeto; así es que hemos podido recibir esta imágen en una pantalla. Pero no sucede lo propio si se acerca el objeto luminoso al espejo á menor distancia que el foco principal. Entónces ya no existe imágen real, sino que el ojo ve detrás del espejo, como en los espejos planos, una imágen de la bujía, á la cual se da el nombre de *imágen virtual*. Es recta, mayor que el objeto, como se representa en la fig. 39; además, sus dimensiones aparentes disminuyen á medida que se acerca la bujía al espejo, y áun tendria las del objeto mismo si este tocase la superficie reflectora.

Fácilmente se pueden observar estos fenómenos con los espejos cóncavos de uso doméstico, y cuya curvatura está calculada de tal suerte

que á corta distancia del espejo se encuentra el observador en la última de las posiciones descritas en el experimento anterior: en este caso ve su rostro más ó ménos agrandado. Si se aleja á mayor distancia, verá cómo se reproducen los

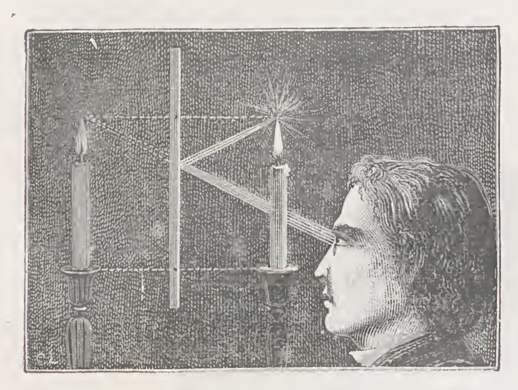


*Fig. 27.*— Formacion de las imágenes vistas por reflexion en un espejo plano

fenómenos indicados, aunque en sentido contrario.

Veamos ahora cómo nos explican las leyes de la reflexion de la luz las principales circunstancias que caracterizan los fenómenos cuya descripcion acabamos de hacer.

Para esto, empecemos por determinar la marcha de un rayo luminoso que caiga y se refleje en la superficie de un espejo cóncavo. Pueden ocurrir dos casos: ó el rayo incidente pasa por el centro de curvatura del espejo, ó pasa á cierta distancia de él. En el primer caso la incidencia es normal y el rayo reflejado debe serlo tambien, es decir, el rayo de luz vuelve por el mismo camino que trajo, sigue despues de la reflexion la marcha que ántes llevaba, y vuelve de nuevo al espacio pasando por segunda vez por el centro. En el segundo caso, sea C el centro del espejo, S I el rayo incidente (fig. 40). Si trazamos el radio de la esfera I C, ocurrirá la reflexion en el plano S I C, puesto que este plano es normal al espejo: por otra parte, la direccion del rayo reflejado I R será tal, que habrá igualdad entre los dos ángulos S I C y C I R.

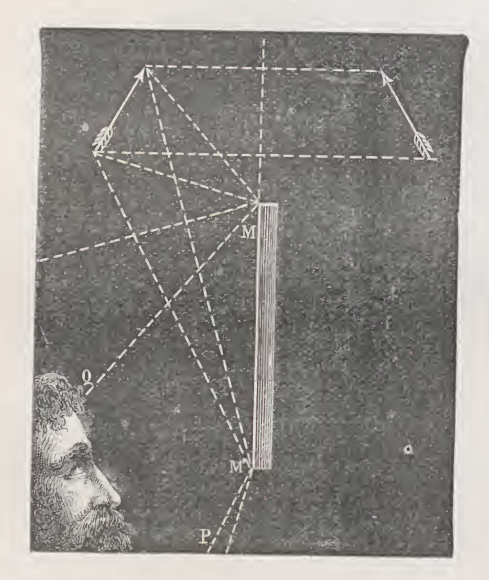



*Fig. 28.*— Reflexion en un espejo plano. Campo del espejo para un objeto dado

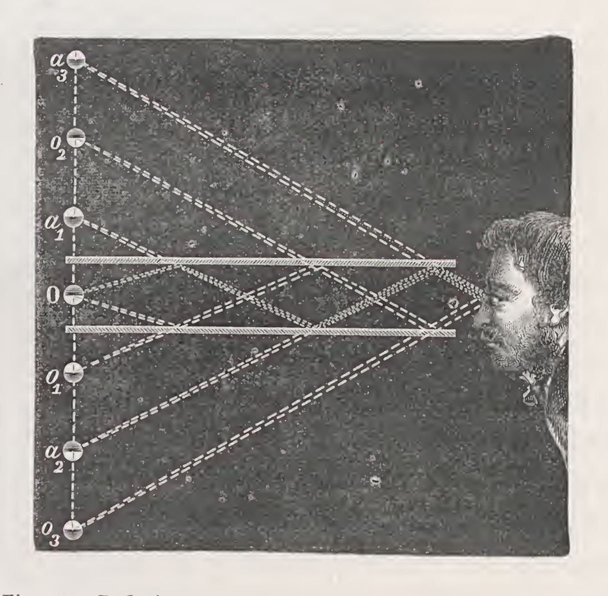



*Fig. 29.*—Reflexion en dos espejos planos paralelos: imágenes múltiples de un objeto situado entre ellos

Bastan estas dos reglas para averiguar las posiciones relativas de todos los rayos ó haces luminosos incidentes y reflejados, sea la que quiera, por otra parte, su situacion respecto del espejo.

Por ejemplo, la figura 41 nos muestra un haz de luz formado de rayos paralelos á un eje principal C A del espejo cóncavo, lo que equivale á suponer que estos rayos emanan de un punto luminoso situado en el eje á una distancia infinita, ó por lo ménos bastante grande para que pueda considerársela tal. Esto ocurre con la luz que llega del Sol, de las estrellas ó tambien de un objeto suficientemente apartado con relacion al radio de curvatura del espejo.

La geometría y la observacion demuestran de consuno que todos los rayos reflejados cortan el eje principal en un mismo punto, situado á igual distancia entre el centro C y el vértice A del espejo. Su reunion produce en F, foco principal, una imágen del punto que percibiria el ojo en el mismo sitio, toda vez que el

haz divergente que penetra en nuestro órgano producirá el mismo efecto que si un objeto luminoso real, situado en el foco, nos enviase un haz semejante. El fenómeno se efectúa con tanta mayor exactitud cuanto más pequeña es la abertura del espejo, es decir, que el ángulo del cono que tiene su vértice en el centro C del espejo y por base el espejo mismo, sea de menor valor: en realidad no debe pasar de 8 á 10 grados.

Por lo demás, siendo esférico el espejo, es una misma la curvatura en todos sus puntos; los rayos reflejados seguirán pues una marcha semejante respecto de los ejes secundarios, esto es, respecto de las líneas rectas indefinidas que unen cada uno de los puntos del espejo con el centro. De modo que hay un crecidísimo número de focos secundarios en estos ejes, situados, como el foco principal, á igual distancia del centro del espejo.

Las figuras 42 y 43 representan la marcha de los rayos, cuando el punto luminoso está situado en el eje, á una distancia del espejo que no es infinita. En esta hipótesis, el haz luminoso está formado de radios que ya no son paralelos y que dan en el espejo formando varios ángulos con su superficie. Aquí pueden presentarse tres casos, segun que el punto luminoso esté más allá del centro del espejo, entre el centro y el foco, ó bien entre éste y el espejo. Demuéstrase geométricamente en todos estos casos que los rayos reflejados convergen en un mismo punto del eje principal, donde se reunen formando un haz, y que este punto es precisamente aquel en el cual se formaban las imágenes, segun nos lo ha hecho ver el experimento.

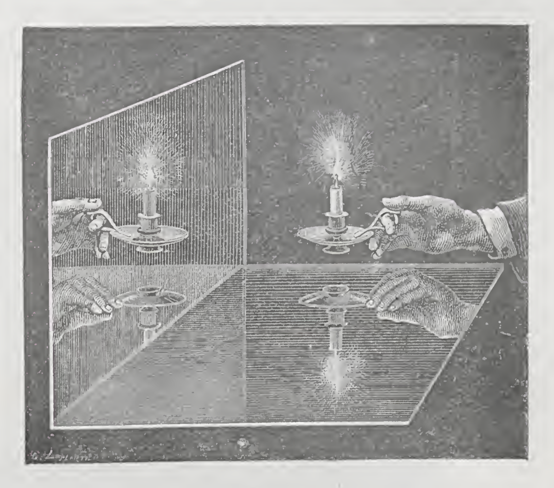


*Fig. 30.*—Imágenes múltiples en dos espejos que forman ángulo recto

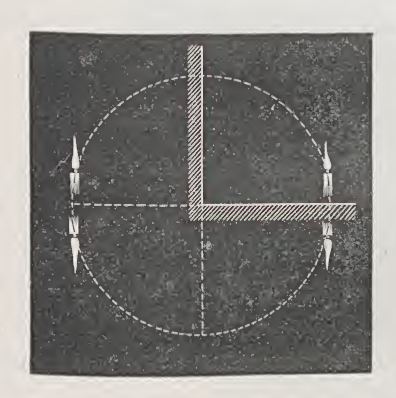


*Fig. 31.*—Espejos en ángulo recto

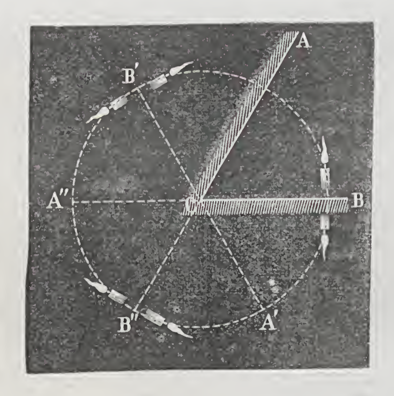



*Fig. 32.*—Espejos en ángulo de 60°

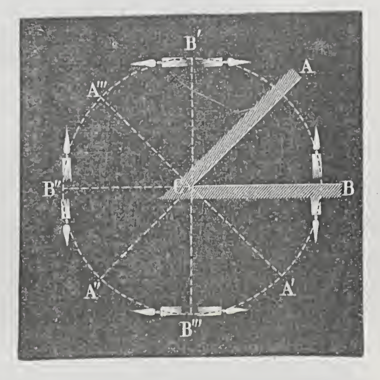



*Fig. 33.*—Espejos en ángulo de 45°

Por ejemplo, si el punto luminoso está en S (fig. 42) más allá del centro del espejo, se refleja en I*s* un rayo SI y corta el eje entre el centro y el foco; los demás rayos, despues de reflejarse, van á pasar por el mismo punto *s*, donde forman una imágen del punto S. Si este último llega al centro mismo, los rayos caen verticalmente sobre el espejo. y al reflejarse vuelven por el camino que primeramente seguian; el punto luminoso y su foco se confunden en el centro del espejo. Si el punto se acerca al espejo, pero á menor distancia que el foco principal, la reflexion se efectúa en el eje más allá del centro.

Ocupémonos ahora del caso en que el punto luminoso está en *s*, entre el centro C y el foco principal (fig. 42); entónces es evidente que uno cualquiera de los rayos incidentes, *s*I, se reflejará en la direccion IS, y que los demás cortarán el eje en el mismo punto S, donde tendrá efecto la convergencia. La imágen de un punto situado entre el centro del espejo y el foco principal resultará pues en el eje más allá del centro; y así lo confirma la experiencia, segun hemos visto anteriormente.

Este resultado prueba—y así podia preverse,

—que si un haz incidente que parta de un punto del eje S produce un haz reflejado que converge en otro punto del eje *s*, otro haz incidente emanado de este último punto, convergerá á su vez, despues de reflejarse en el espejo, precisamente en el punto de partida del primer haz. En una palabra, el camino recorrido en un sentido por un rayo de luz que da en un punto del espejo y se refleja en él, lo recorre en direccion enteramente opuesta otro rayo de luz que da en el



*Fig. 34.*—Polemoscopio

mismo punto, si la direccion de incidencia del segundo rayo coincide con la direccion de reflexion del primero.

Así pues, los dos puntos S y *s* son alternativamente focos uno para otro, y por esta ra-



*Fig. 35.*—Imágenes simétricas ormadas en el kaleidoscopio

zon se los llama *focos conjugados.* El foco conjugado del foco principal llega á lo infinito, lo que equivale á decir que los rayos emanados de este punto van á parar paralelamente al eje del espejo.

Cuando el punto luminoso S está entre el foco y el centro del espejo, se refleja en I R un rayo incidente SI, es decir, se aparta del eje (fig. 43); en este caso ya no habrá convergencia de los rayos que componian el haz luminoso, y por consiguiente, tampoco habrá imágen real, segun nos lo habia enseñado la experiencia. Con todo, se demuestra que prolongando por detrás del eje los rayos reflejados, se cortan en un punto formando así un foco que, por oposicion al foco real de los casos precedentes, lleva el nombre de *foco virtual.* Y en efecto, un espectador situado delante del espejo percibe siempre una imágen, porque los rayos divergentes penetran en su ojo siguiendo la misma marcha que si en realidad emanaran del punto *s*. La imágen es entónces virtual, lo propio que la vista en un espejo plano.

Si se ha comprendido bien la marcha de un haz luminoso que cae sobre la superficie de un espejo cóncavo, y cómo produce despues de su reflexion un haz reflejado, convergente ó divergente, segun la posicion del punto luminoso, no será ya difícil darse cuenta de la produccion de las imágenes de los objetos, imágenes ora reales, ora virtuales, ya más grandes, bien

más pequeñas que los objetos mismos, y finalmente unas veces rectas y otras invertidas. En las figs. 44 y 45 se ven dos ejemplos de ello.

Véase cuáles son las reglas de la construccion geométrica de las imágenes, y cómo se pueden explicar sus posiciones y sus dimensiones comparadas con las del objeto. Primeramente se buscan las imágenes de cada punto extremo A, B. Con este objeto se reune cada uno de estos puntos con el centro del espejo,

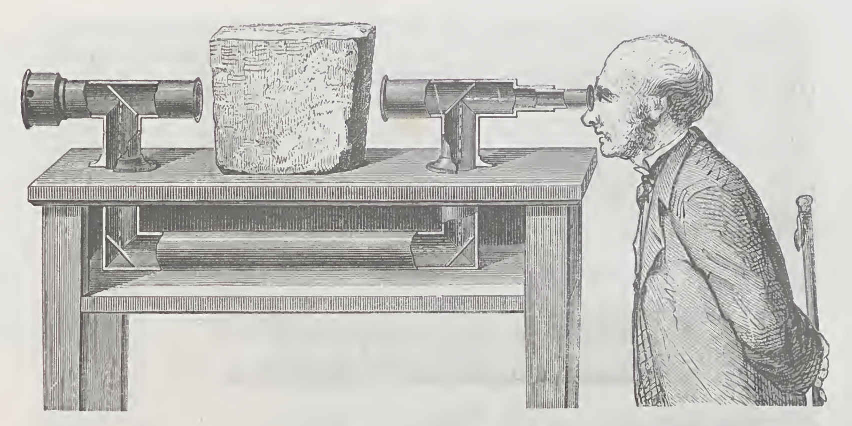


*Fig. 36.*—Anteojo mágico

lo cual nos da las líneas AC, BC, que son los ejes secundarios; luégo se trazan los rayos paralelos al eje principal que, segun hemos visto, deben reflejarse en el foco F. Los puntos de encuentro de los rayos reflejados con el eje secundario correspondiente, dan *a* y *b*, que son



*Fig. 37.*—Espejo cóncavo: imágen invertida, menor que el objeto

los focos de los puntos A y B, es decir, aquellos en que se forman las imágenes de las extremidades del objeto.

Los focos y las imágenes son siempre virtuales en los objetos convexos, porque los rayos de que se compone el haz luminoso incidente divergen siempre despues de su reflexion, como puede verse si se observa la marcha de alguno de ellos. Tambien se ve en qué consiste que la imágen sea recta en esos espejos (fig. 47), pero siempre más pequeña que el objeto. Por lo demás, las dimensiones son tanto más redu-

cidas cuanto mayor es la distancia del objeto al espejo. Si la abertura de este es muy grande, se nota una deformacion que está en relacion de la amplitud de aquella. Cualquiera puede cerciorarse de esta circunstancia examinando una bola bruñida semejante á la representada en la figura 46. Por lo regular se coloca en los jardines esta clase de espejos esféricos (que son globos de cristal azogados interiormente, ó bien de cristal negro, llamados *globos periscópicos*), en cuya superficie se refleja todo el paisaje de alrededor.

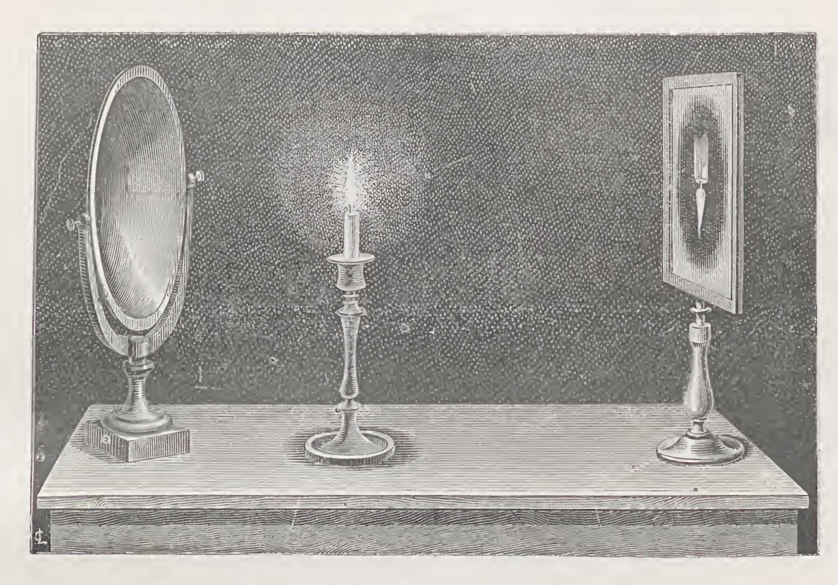


*Fig. 38.*—Espejo cóncavo: imágen invertida, mayor que el objeto

Tambien se hace mencion en óptica de los espejos parabólicos cóncavos, que tienen la propiedad de concentrar los rayos paralelos al eje de la parábola en el foco de esta curva, cualquiera que sea la abertura del espejo, y que reflejan del mismo modo, en haces paralelos, toda la luz de un objeto luminoso situado en el foco. Los espejos esféricos no dan este resultado sino cuando su abertura es muy pequeña.

Para resolver los diferentes problemas relativos á los espejos esféricos convexos ó cóncavos, es preciso conocer su radio de curvatura, es decir, el radio de la esfera á que pertenecen. Ya se ha visto que este radio es el doble de la distancia focal, por consiguiente la cuestion se reduce á averiguar prácticamente la posicion del foco, cosa fácil respecto de un espejo cóncavo, pues exponiéndolo á los rayos solares y recibiendo la imágen en una pantalla, se encuentra en seguida la posicion en la que esta imágen tiene las dimensiones más reducidas: entónces la distancia focal es la de la pantalla al espejo.

Si el espejo es cóncavo, se cubre su superficie con una hoja de papel negro en la que se han abierto préviamente dos agujeros $p$ y $p'$. Entónces se vuelve el espejo hácia el sol, y por medio de una pantalla que tenga una abertura conveniente se busca la posicion respecto de la cual el intervalo de las dos líneas R y R′ de los haces reflejados por los puntos $p$ y $p'$ es doble que la distancia entre estos puntos. Entónces la distancia G A de la pantalla al espejo es igual á la focal, como fácilmente se prueba en



*Fig. 39.*—Espejo cóncavo: imágen virtual, recta y mayor que el objeto

la figura por la comparacion de los triángulos semejantes F $pp'$ y F R R'.

Cuando se examina cuál es, para un espejo esférico, la marcha de los rayos reflejados procedentes de un punto luminoso situado en el

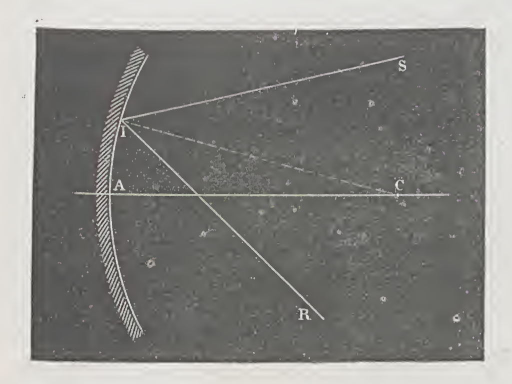



*Fig. 40.*—Marcha de un rayo luminoso en la superficie de un espejo cóncavo

eje á cualquier distancia, reconócese que estos rayos se cortan sucesivamente, primero en los diferentes puntos del mismo eje, y luégo fuera de él, de suerte que los puntos de interseccion forman una superficie que los geómetras llaman *cáustica*. La luz se acumula en todos los puntos de esta superficie más que en cualquiera otra parte, estando su mayor concentracion en el foco del punto dado. La cáustica varía de forma con la posicion y la distancia del punto luminoso; pero es posible comprobar prácticamente su existencia.

Hácese uso con este objeto de una pantalla de carton blanco, recortada de modo que reproduce la forma del espejo al pasar por su centro. Expuesta á la luz del Sol ó á la de una lámpara, se nota en ciertas partes de la pantalla una luz más viva cuyos contornos indican la forma de la cáustica, forma que es evidentemente la

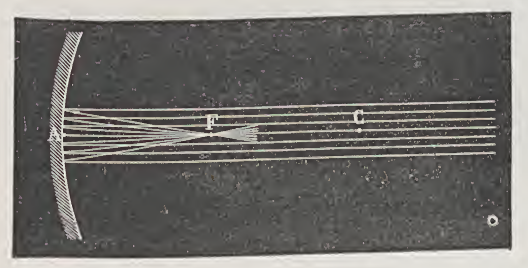



*Fig. 41.*—Espejo cóncavo: marcha y reflexion de los rayos paralelos al eje. Foco principal

misma, cualquiera que sea la posicion de la pantalla alrededor del centro. Una placa circular de metal, bruñida interiormente, y puesta sobre un plano, indicaria del propio modo la forma de esta curva con respecto á un espejo cilíndrico (figura 49). Brewster fué quien ideó este experimento.

Cuando se expone á los rayos del sol un vaso lleno de leche, ó mejor aún, lleno de tinta, como dice J. Herschel, se ve en la superficie líquida una línea curva brillante con un punto de retroceso hácia el foco: este punto es la interseccion de la cáustica del espejo cilíndrico cóncavo que forma el vaso con el plano que limita el líquido en la superficie superior (fig. 50).

## VI

### IMÁGENES EN LOS ESPEJOS CILÍNDRICOS Y CÓNICOS.— ANAMORFÓSIS

Los espejos cilíndricos convexos ó cóncavos producen imágenes en las que no aparecen alteradas las dimensiones de los objetos en el sentido de la longitud del cilindro ó de sus aristas, pero que en cambio sufren una mudanza en una direccion perpendicular á la primera, es

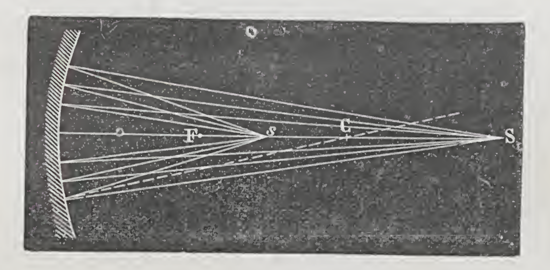



*Fig. 42.*—Espejo cóncavo: focos conjugados

decir, segun las circunferencias de las secciones normales. Los rayos reflejados á lo largo de una misma arista siguen la marcha que emprenderian en un espejo plano; los que se reflejan en la circunferencia misma van por el rumbo que les haria tomar la reflexion en un espejo esférico. Si el cilindro es convexo, la imágen se estrechará; si cóncavo, tan pronto aparecerá más estrecha como más ancha, segun la distancia del objeto al espejo.

Las imágenes producidas por reflexion en los espejos cónicos convexos, se deforman en el sentido de las circunferencias, y como el grado de curvatura cambia de la base al vértice, resulta que las dimensiones sufren una depresion lateral tanto mayor cuanto más cerca estén del vértice. Si la superficie cónica fuese cóncava, la forma de la imágen seria piramidal, pero en ciertas posiciones del objeto, seria ensanchada.

En todos estos espejos, la reflexion de los

rayos luminosos se efectúa siempre con arreglo á las leyes que hemos consignado; de suerte que se han podido hacer dibujos raros y disformes, en los que no se discierne forma alguna determinada y que, sin embargo, al reflejarse en espejos cilíndricos y cónicos, presentan una imágen que es representacion exacta de algun objeto conocido. Dase el nombre de *anamorfósis* á esta inversion de formas. En las tiendas de objetos de óptica ó de quincalla se venden cuadros cuyas líneas y colores se han combinado para producir imágenes regulares de paisajes, de personajes, de animales, etc., cuando se pone en el centro del cuadro el espejo cilíndrico ó cónico, para el cual se han trazado (figs. 51, 52 y 53).

## VII

### LUZ REFLEJADA CON IRREGULARIDAD Ó LUZ DIFUSA

Hasta aquí tan sólo nos hemos ocupado de la luz reflejada con regularidad en la superficie de los cuerpos pulimentados; y los fenómenos que origina esta reflexion demuestran suficientemente, segun dejamos dicho, que si el grado de pulimento fuese perfecto, el cuerpo reflector seria invisible para nosotros: se veria la imágen más ó ménos deformada de los objetos luminosos que rodean á dicho cuerpo, pero sin ver á este. Y si todos los cuerpos se hallasen en el mismo caso, á excepcion de los focos de luz, el ojo no divisaria más que una muchedumbre infinita de imágenes de cuerpos luminosos, por ejemplo, del Sol, sin ver otra cosa. Si en una cámara oscura se dirigen los rayos solares hácia un espejo, la superficie de este da una imágen deslumbradora del Sol, pero los demás puntos del cuerpo reflector son ligeramente visibles tan sólo á causa de la escasa fraccion de luz que se refleja irregularmente en su superficie. Esta luz difusa es la que permite ver el espejo desde todos los puntos de la cámara oscura (1).

La proporcion de luz especular y de luz difusa reflejada por un cuerpo varía, no tan sólo con el pulimento de la superficie, sino tambien con la naturaleza y color del cuerpo y además con el ángulo de los rayos incidentes. Una hoja de papel blanco mate refleja la luz en todas direcciones; pero su blancura es tanto más deslumbradora cuanto más perpendicularmente está expuesta al foco luminoso. Si el observador se coloca para examinar la superficie de la hoja en direcciones cada vez mas obilcuas, la proporcion de la luz difusa disminuye, y por lo tanto el brillo de la superficie. En cambio el ojo recibe rayos más y más numerosos reflejados irregularmente, de suerte que poniendo la

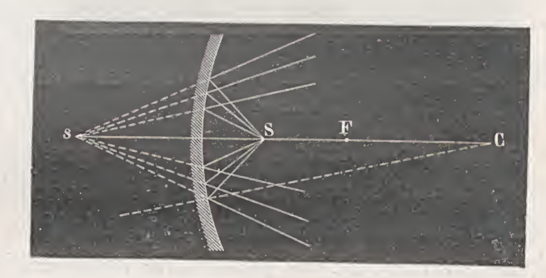



*Fig. 43.*—Espejo cóncavo: foco virtual

llama de una bujía muy cerca de la superficie de una hoja de papel, y observándola oblicuamente en direccion opuesta, se ve una imágen muy distinta de la llama, reflejada como en un espejo (fig. 54).

Al decir que la luz difusa es la luz reflejada irregularmente, esto no significa que los rayos de que se compone sigan al reflejarse otras leyes que la luz especular. La irregularidad á que nos referimos procede de las asperezas de la superficie de los cuerpos mates, rugosos, que reciben la luz con distintas incidencias y los reflejos en todas direcciones (fig. 55). Cuando se mira con mucha oblicuidad semejante superficie, las asperezas se ocultan unas á otras y crece el número de los rayos emanados de elementos paralelos á la direccion general de la superficie, lo cual explica la proporcion creciente de la luz reflejada con regularidad.

No es dudoso que la cantidad de luz reflejada especularmente varíe con el estado de la superficie de los cuerpos. Un trozo de cristal terso se convierte en un espejo, pero deslustrado, casi no refleja más que luz difusa. En el mismo caso se hallan la madera pulimentada, el mármol, el asta, y otra porcion de sustancias. Pero el *poder reflector*, aplicando este

(1) Por consiguiente, un cuerpo no luminoso por sí mismo se hace visible merced tan sólo á la luz difusa que su superficie refleja por todas partes. Sin embargo, más adelante veremos que hay un gran número de sustancias que tienen la propiedad de emitir luz propia, cuando se las expone á los rayos de un foco luminoso más ó ménos intenso; tales son las sustancias llamadas fosforescentes. Quizás disfruten todos los cuerpos de la misma propiedad en grados muy diferentes, de suerte que tal vez deban su visibilidad en parte á la fosforescencia, y en parte tambien á la difusion de la luz.

nombre á la propiedad de reflejar especularmente la luz en mayor ó menor proporcion, varía á igualdad de pulimento con la naturaleza de las sustancias y con el ángulo de incidencia. De cien rayos recibidos por el agua, el cristal, el mármol negro pulimentado, el azogue, el estaño de espejos, con una incidencia de 50º, la primera refleja 72, el segundo 54, y el tercero 60 y el mercurio y el estaño de espejos 70. Si la incidencia aumenta, el número de rayos reflejados disminuye para los tres primeros cuerpos en progresion rápida, no siendo más que de 2 ó 3 á lo sumo entre 60º y 90º; al paso que con esta última incidencia el mercurio refleja todavía 60 rayos sobre 100.

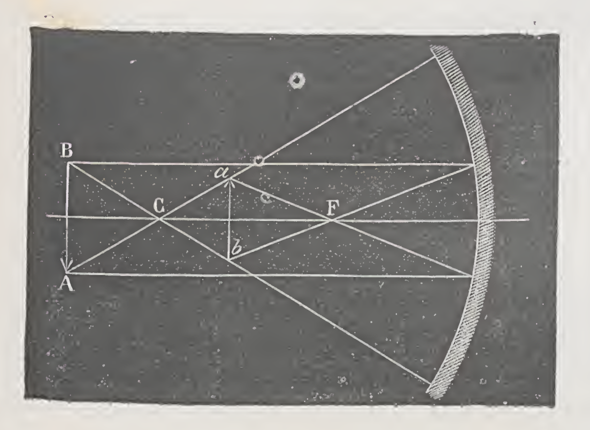



*Fig. 44.*—Espejo cóncavo: imágenes reales é invertidas de los objetos

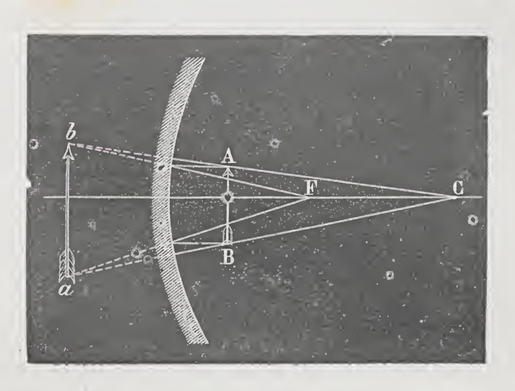



*Fig. 45.*—Espejos cóncavos. Imágen recta y real de los objetos



*Fig. 46.*—Imágen recta virtual en los espejos esféricos convexos

Los cuerpos de color oscuro reflejan muy poca luz. El negro de humo no refleja luz difusa, y sí tan sólo una escasa cantidad de luz especular.

Cuando la reflexion de la luz tiene efecto en una superficie pulimentada, pero trasparente, reprodúcense tambien las imágenes, pero muy debilitadas, porque una gran parte de la luz incidente atraviesa la sustancia. Por esta causa los espejos se azogan por su parte posterior y entonces las claras imágenes que se forman en la capa metálica opaca de gran pulimento, amortiguan con su brillo las tenues imágenes producidas por la reflexion en la cara anterior del cristal.

Pero tambien se pueden emplear las lunas sin azogar, produciendo imágenes muy brillantes y de vivos colores, cuando los objetos que reflejan reciben mucha luz y al mismo tiempo el espacio que las rodea, sumido en una oscuridad relativa, recibe poca ó ninguna luz difusa. En esto se basa el principio de las apariciones fantásticas conocidas en el teatro con el nombre de *espectros*, acerca de lo cual indicaremos algo en las *Aplicaciones de la óptica*.

# CAPÍTULO V

## REFRACCION DE LA LUZ

### I

### FENÓMENOS DE REFRACCION.

En los capítulos anteriores hemos visto que todo haz luminoso se propaga siguiendo una direccion rectilínea en un medio homogéneo; que si tropieza en la superficie de un cuerpo sin salir de este medio, una parte mayor ó menor de los rayos que componen el haz primitivo regresa ó se refleja en el medio de donde habia partido, siguiendo para esta nueva direccion las leyes de la reflexion. Vamos ahora á

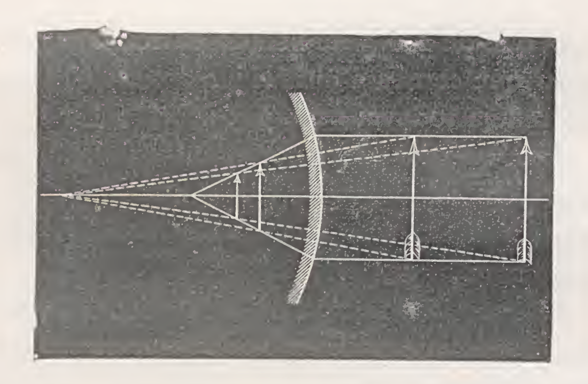


*Fig. 47.*—Espejo convexo. Imágen recta y virtual

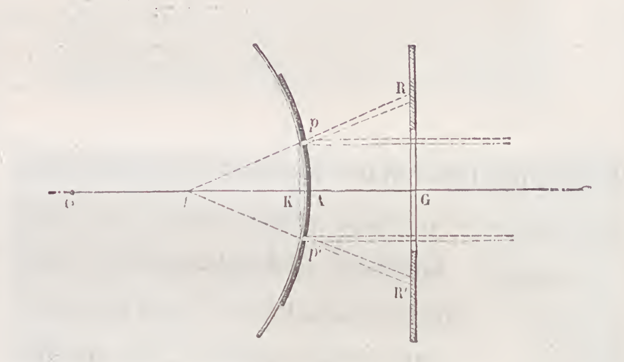



*Fig. 48.*—Determinacion de la distancia focal de un espejo convexo

examinar el caso en que el haz luminoso pase de un medio homogéneo á otro que tambien lo sea, pero de naturaleza y sobre todo de densidad diferentes.

Hagamos penetrar en la cámara oscura un haz de luz solar, y pongamos en su camino una cuba rectangular llena de agua, cuyas paredes sean placas de cristal trasparentes. Como el agua y el aire contienen siempre partículas de polvo en suspension, se verá fácilmente en la oscuridad el camino seguido por el haz.

Si la direccion de los rayos luminosos es normal ó perpendicular á la cara de la cuba, se advertirá que su trayectoria es enteramente rectilínea: el haz, que tiene en el aire la direccion A S (fig. 56) entrará en la cuba sin desviarse, seguirá el rumbo A B, prolongacion del camino aéreo, y saldrá lo mismo por la cara opuesta. Las tres líneas A S, A B y C B serán una sola línea recta.

Si, por el contrario, se hace llegar el haz luminoso oblicuamente, se notará una desviacion: el haz A S se acercará á la normal al entrar en el agua, pero se apartará de ella á la salida, de

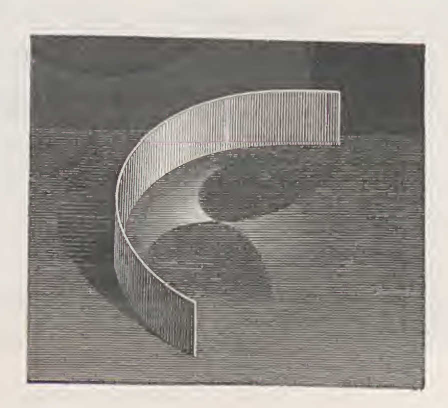


*Fig. 49.*—Cáustica por reflexion

suerte que el camino C B seguido en el aire despues del paso por la cubeta, será paralelo á la direccion primitiva (fig. 57).

Esta desviacion sufrida por la direccion de un rayo luminoso al pasar de un medio á otro es lo que se llama *refraccion de la luz*, dándo-

se el nombre de *medios refringentes* á los que originan los fenómenos de refraccion. En breve veremos que estos fenómenos son más complejos de lo que lo haria suponer el experimento que acabamos de describir, y con frecuencia

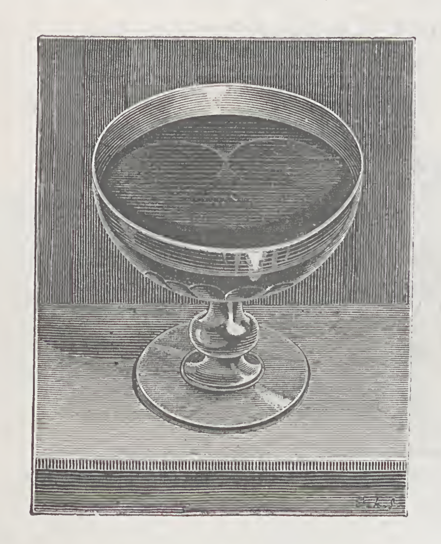


*Fig. 50.*— Cáustica por reflexion

van acompañados de efectos de coloracion que estudiaremos aparte con el nombre de fenómenos de *dispersion*. Por otro lado, hay medios refringentes en los cuales se divide el haz en dos partes distintas, siguiendo una de ellas las leyes de refraccion ordinaria ó *simple*, y hallándose la segunda sometida á otras leyes. Entónces se dice que hay *doble refraccion*.

Nos ocuparemos en primer lugar de la refraccion simple, describiendo algunos de los efectos que produce en el aspecto aparente de los objetos vistos á través de los medios refringentes.

Cuando sumergimos un palo recto en el agua trasparente, parece que la parte vista á través del líquido (fig. 59) no es continuacion en línea recta de la porcion que queda fuera del agua: el palo parece roto en la superficie del líquido, y el extremo sumergido parece tambien levantado y más corto de lo que debiera, ó que el agua es ménos profunda en aquel sitio. Si colocamos el palo verticalmente, ó si el ojo recibe los rayos visuales en una direccion que lo haga aparecer como si estuviera vertical, entónces no parece quebrado el palo, sino sencillamente más corto.

Puede hacerse con facilidad este experimento, sumergiendo el extremo de un lapicero en un vaso lleno de agua. Si ántes de llenar el vaso del líquido trasparente se observa el fondo por encima de los bordes desde un punto fijo, y luégo, sin cambiar de postura, se vierte el agua progresivamente, se ve que los contornos del fondo se elevan poco á poco y que al fin aparecen más altos de lo que al principio indicaba la simple perspectiva. Para que el experimento sea más perceptible, se coloca una moneda pegada con cera al fondo del vaso ó vasija de manera que los bordes la oculten á la vista; y en seguida se va echando agua en esta. A medida que sube el nivel del líquido, se hace visible el objeto y toma la posicion aparente que indica la figura 58. Nadie habrá seguramente que no haya tenido ocasion de observar efectos análogos. Por ejemplo, los objetos vistos por trasparencia á través de una botella llena de agua aparecen deformados, de mayor tamaño y fuera de su posicion natural: al seguir con la vista los movimientos de los peces que se tienen en una pecera, llama la atencion que estos animales desaparezcan de pronto, ó bien adquieran un tamaño desmesurado y que luégo disminuyan hasta el punto de aparecer con sus dimensiones verdaderas.

Todos estos fenómenos reconocen por causa la *refraccion de la luz*, es decir, la desviacion que los rayos luminosos sufren al pasar de un medio á otro, por ejemplo, del aire al agua.

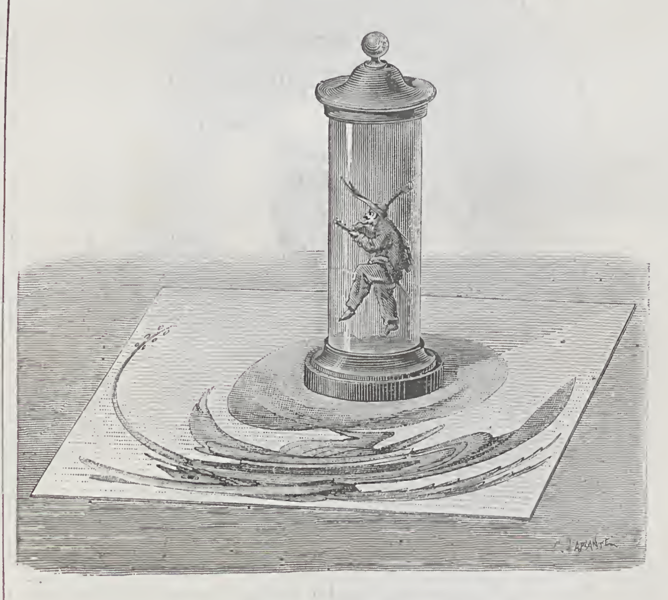


*Fig. 51.*— Espejo cilíndrico. Anamorfósis

Ocurren fenómenos semejantes no tan sólo

en toda clase de líquidos, sino tambien en los sólidos trasparentes, como el cristal, y tambien en todos los gases, con la diferencia, segun veremos más adelante, de que la desviacion varía con la oblicuidad de la luz en el momento en que esta cambia de medio, y con la naturaleza y densidad de los diferentes medios.

Hace ya mucho tiempo que se demostraron los principales efectos de la refraccion de la luz, y el aspecto de los objetos á través de un agua límpida sirvió sin duda para esclarecer en este punto las ideas de los sabios de la antigüedad (1). Los antiguos astrónomos, Tolomeo por ejemplo, conocian los efectos de la refraccion atmosférica ó desviacion que sufren los rayos luminosos de los astros al pasar del vacío de los espacios planetarios á las capas cada vez más densas de la atmósfera; sin embargo, hasta principios del siglo XVII no se descubrieron las leyes que rigen la marcha de un rayo luminoso cuando pasa de un medio homogéneo á otro tambien homogéneo, descubrimiento efectuado por un jóven geómetra holandés llamado Willebrod Snell. Estas leyes llevan á veces el nombre de Descartes, porque este grande hombre las descubrió á su vez, ó por lo ménos las formuló de un modo que todavía subsiste en la ciencia.

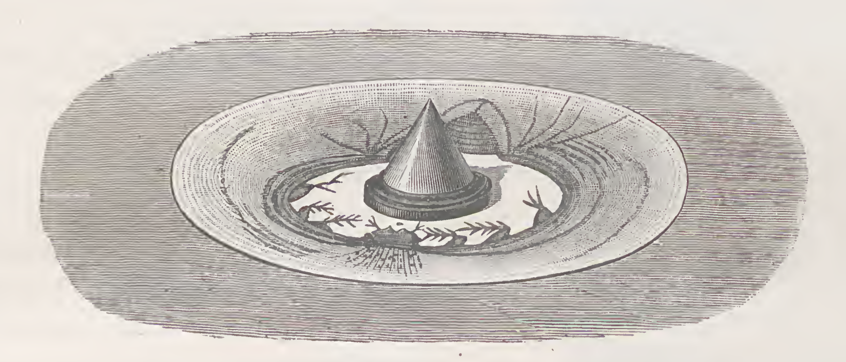


*Fig. 52.*—Reflexion en los espejos cónicos. Anamorfósis

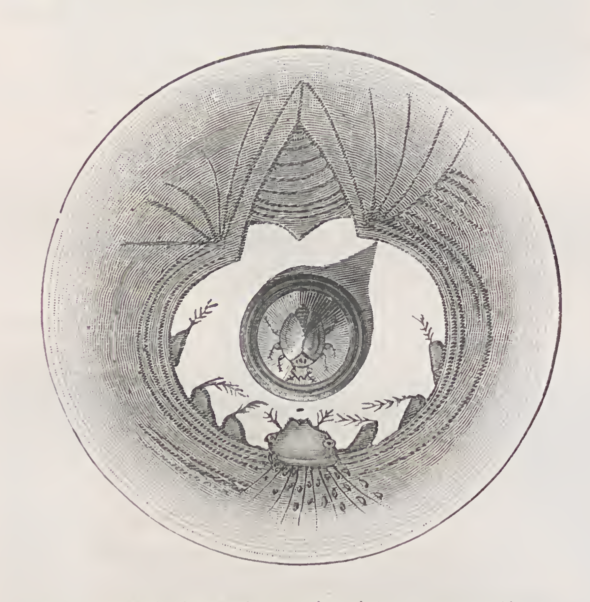


*Fig. 53.*—Reflexion en los espejos cónicos. Anamorfósis

## II

### LEYES DE LA REFRACCION DE LA LUZ

Un rayo ó haz luminoso se propaga de un medio homogéneo á otro tambien homogéneo; y llega á un punto de la superficie de separacion, formando con la línea perpendicular ó normal á esta superficie cierto ángulo que se llama *ángulo de incidencia.* Al penetrar en el segundo medio, continúa su marcha en línea recta, pero siguiendo una direccion más ó ménos distinta de la primera y formando con la normal un ángulo llamado *ángulo de refraccion* y que por lo comun no es igual al de incidencia. ¿En qué relacion se encuentran ambos ángulos? ¿Cuál es la direccion del haz ó rayo re-

(1) Euclides hizo ya mencion del experimento de la vasija que se llena de agua y cuyo fondo parece elevarse progresivamente, y Aristóteles observó que los remos parece que se rompen al salir del agua. Séneca se ocupa, con más ó ménos exactitud, en el libro I de las *Cuestiones naturales,* de algunos efectos de la refraccion. «Todos los objetos vistos á través del agua, dice, parecen mucho más grandes. Los caractéres pequeños y confusos leidos al través de un globo de cristal ó una redoma llena de agua aparecen mayores y más claros. Los frutos puestos en agua en una vasija de cristal llena de agua parecen más hermosos de lo que son en realidad, y los astros, más grandes vistos al través de una nube (?), porque la vista humana no puede penetrar en un flúido ni percibir exactamente los objetos. Esto último se hace patente llenando de agua una copa y echando en ella un anillo; por más que este permanezca en el fondo, su imágen se reproduce en la superficie. Todo cuanto se ve á través de un líquido cualquiera es de tamaño bastante mayor que el natural.» De esta cita se desprende que los antiguos habian observado los fenómenos de refraccion, pero que los conocian imperfectamente y sobre todo que ignoraban sus condiciones y sus leyes.

fractado respecto del haz ó rayo incidente? A estas preguntas responden los enunciados de las leyes de la refraccion simple.

Hé aquí cómo se pueden demostrar experimentalmente estas leyes:

Al efecto podemos valernos del aparato representado en la figura 60, que, como se ve, se compone de un círculo graduado en cuyo

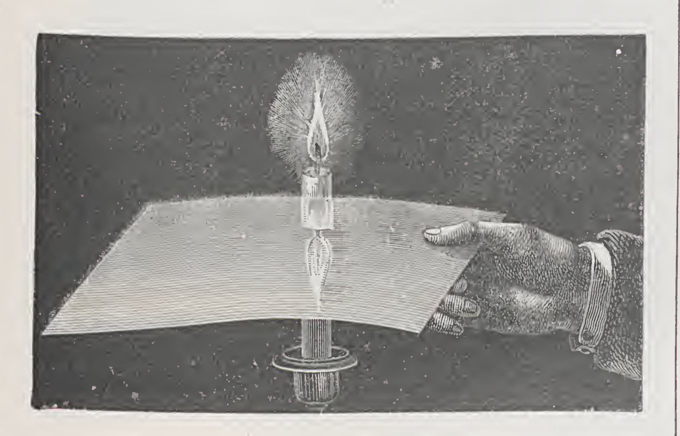


*Fig. 54.*—Luz reflejada con mucha oblicuidad

centro hay un vaso de vidrio fijo de forma cilíndrica cuyo eje es horizontal y pasa por el centro del círculo. Se le llena hasta la mitad de agua ú otro líquido; y si se coloca el aparato de tal suerte que se halle el círculo en posicion vertical, la superficie del líquido tranquilo, que es horizontal, cortará el círculo en su centro y será perpendicular al diámetro vertical, diámetro que coincide con el cero de las divisiones del limbo.

Se hace llegar entónces un rayo incidente, que provenga por ejemplo del Sol, al punto I de un espejo que se inclina de modo que refleje el rayo en la direccion del centro O del círculo á través del agujerito de un diafragma, fijo como el espejo á una alidada móvil alrededor del centro. El rayo atraviesa la pared cilíndrica de cristal, llega á la superficie del agua, penetra en el líquido y sale por el contorno del cilindro de cristal. Hé aquí lo que entónces se observa:

Si el rayo luminoso incidente entra en el líquido siguiendo la direccion de la vertical, sale sin desviarse, lo cual se demuestra recibiéndolo en el centro de otro diafragma fijo á una segunda alidada; de modo que cuando la incidencia es vertical no hay refraccion.

Si se hace variar el ángulo de incidencia, se observa que el de refraccion varía tambien, pero en todos los casos y en todas las posiciones de la alidada por donde llega el rayo incidente, el rayo refractado, despues de su salida del cilindro, lo cual se efectúa sin nueva desviacion, coincide siempre en direccion con el eje de la segunda alidada. Este resultado, que demuestra la segunda ley, se enuncia del modo siguiente:

*Cuando un rayo luminoso pasa de un medio á otro, se quiebra, y el rayo incidente y el refractado permanecen en un mismo plano perpendicular ó normal á la superficie de separacion de los medios.*

Ahora hay que hallar la ley de variacion de los ángulos de refraccion y de incidencia. Por medio de la primera alidada provista de una punta en su extremidad opuesta, se obtiene la direccion del rayo incidente, y se puede medir la línea *o a* en una regla dividida horizontal, capaz de moverse paralelamente á sí misma. Esta línea, ó mejor dicho su relacion con la longitud del radio *a* O, es lo que llaman los geómetras *seno del ángulo de incidencia.* Otra alidada, provista igualmente de un diafragma agujereado, recibe el rayo luminoso refractado despues de pasar por el agua, y se mide *o b* en la regla: la relacion de *o b* con el radio O *b* igual á O *a* da el *seno del ángulo de refraccion.* Advertiremos que al salir el rayo del agua para volver á pasar al aire, no sufre ninguna nueva refraccion, puesto que sale por una incidencia normal á la superficie del vaso cilíndrico.

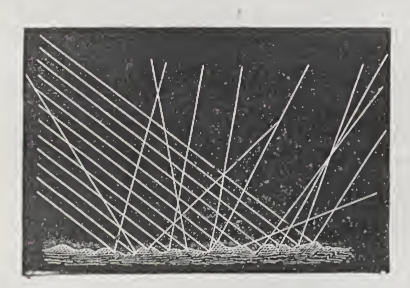


*Fig. 55.*—Reflexion irregular de la luz en la superficie de un cuerpo no bruñido

Pues bien, supongamos que la primera observacion haya dado dos senos tales, que dividiendo el ángulo de incidencia por el de refraccion, el cociente ó relacion sea 1,335. Repitamos el experimento una, dos, tres ó más veces, cambiando á cada una de ellas la direccion del

rayo incidente. A cada nuevo experimento, la relacion del seno de incidencia y del de refraccion seguirá siendo 1,335. Y lo mismo sucederá miéntras los medios sean el aire y el agua; pero este número, que se llama *índice de refraccion*, varía cuando cambia uno de los medios ó cuando cambian ambos; así pues, el índice de refraccion del aire al cristal no es igual al del aire al agua. Por esta causa se calculan los medios de todos los cuerpos trasparentes

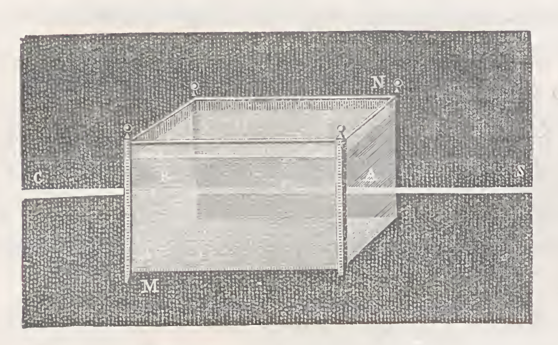



*Fig. 56.*—Incidencia normal; falta de desviacion

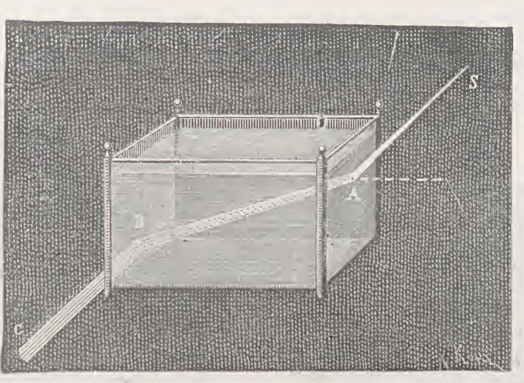



*Fig. 57.*—Incidencia oblicua. Refraccion

suponiendo que la luz pasa del vacío á cada uno de ellos, y entónces se obtienen los índices *absolutos* (1). Por lo comun, es tanto mayor la refraccion cuanto más denso es el medio, si bien hay algunas excepciones (2), de modo que las más de las veces la refringencia del medio crece con su densidad.

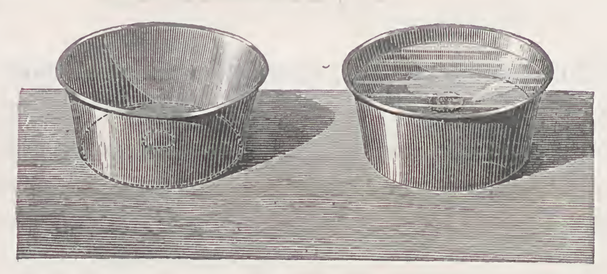


*Fig. 58.* — Elevacion aparente del fondo de una vasija por refraccion

La segunda ley de la refraccion de la luz (3), se puede enunciar de este modo:

*La relacion entre los senos de los ángulos de*

---

(1) A cada momento es preciso tener en cuenta los índices de refraccion en los problemas de dióptrica: la construccion de los instrumentos en que se emplean prismas y lentes de varias sustancias refringentes, requiere tambien que se conozca con precision este elemento. Por último, en química y en mineralogía el índice de refraccion es un carácter que sirve para distinguir entre sí ciertas sustancias que podrian confundirse por su aspecto exterior. Así es que desde Descartes hasta nuestros dias, los físicos se han dedicado á idear ó perfeccionar los métodos que tienen por objeto la medicion de los índices de refraccion, ya de los cuerpos sólidos refringentes, ya de los líquidos ó bien de los gases.

No nos es posible descender aquí á los detalles que requeriria la exposicion de estos métodos; pero como podrá ser útil conocer los resultados obtenidos, á lo ménos respecto de algunas de las sustancias más comunes, los resumimos en el cuadro siguiente:

ÍNDICES DE REFRACCION

*Cuerpos sólidos*

| | |
|---|---|
| Cromato de plomo. . . . . . . . . | 2,50 á 2,97 |
| Diamante. . . . . . . . . . . . | 2,60 |
| Fósforo. . . . . . . . . . . . | 2,22 |
| Azufre nativo. . . . . . . . . . | 2,115 |
| Rubí. . . . . . . . . . . . . | 1,779 |
| Cristal (flint-glass). . . . . . . . | 1,605 |
| Esmeralda. . . . . . . . . . . | 1,585 |
| Sal gema. . . . . . . . . . . . | 1,550 |
| Cristal de Saint Gobain. . . . . . . | 1,543 |
| Cuarzo. . . . . . . . . . . . . | 1,540 |
| Azúcar piedra. . . . . . . . . . | 1,535 |
| Bálsamo del Canadá. . . . . . . . | 1,530 |
| Vidrio (crown-glass). . . . . . . . | 1,529 |
| Alumbre. . . . . . . . . . . . | 1,441 á 1,488 |
| Borato de sosa. . . . . . . . . . | 1,475 |
| El cristalino del ojo. . . . . . . . | 1,384 |
| Hielo (agua sólida). . . . . . . . | 1,310 |

*Líquidos*

| | |
|---|---|
| Sulfuro de carbono á 0°. . . . . . . | 1,644 |
| — á 20°. . . . . . . | 1,624 |
| Aceite de linaza. . . . . . . . . | 1,481 |
| — de nafta. . . . . . . . . | 1,475 |
| — de oliva. . . . . . . . . | 1,470 |
| Alcohol absoluto á 10°. . . . . . . | 1,366 |
| — á 25°. . . . . . . | 1,360 |
| Agua destilada á 0°. . . . . . . . | 1,333 |
| — á 30°. . . . . . . . | 1,331 |
| Humor acuoso. . . . . . . . . . | 1,337 |
| — vítreo. . . . . . . . . . | 1,339 |

*Gases*

| | |
|---|---|
| Aire. . . . . . . . . . . . . . | 1,000294 |
| Oxígeno. . . . . . . . . . . . | 1,000272 |
| Hidrógeno. . . . . . . . . . . | 1,000138 |
| Nitrógeno. . . . . . . . . . . | 1,000300 |

Debemos hacer observar que los índices de refraccion de los sólidos y líquidos que preceden son los que corresponden á un haz de luz homogéneo (la de la raya D del espectro ó del alcohol salado) Más adelante veremos que la luz blanca está formada de rayos que se refractan con desigualdad en los mismos medios Por consiguiente, los índices de refraccion de estos medios varian con la naturaleza de los rayos de luz que en ellos se refractan.

(2) Por ejemplo, la densidad del aceite de trementina es 0,869, es decir, menor que la del agua, y sin embargo, ésta es ménos refringente que aquél. El índice de refraccion del alcohol, del éter, de los aceites fijos y volátiles excede con mucho al del agua; pero la densidad de dichos cuerpos es menor que la de ésta.

(3) Más arriba hemos visto que el enunciado de esta ley se debe á Descartes. Keplero habia ya reconocido que respecto de los ángulos pequeños de incidencia (hasta 30° próximamente) habia proporcionalidad entre los ángulos de incidencia y de refraccion; lo que es verdad hasta cierto punto, porque entónces los ángulos y los senos varian casi del mismo modo; pero tambien sabia que, pasado aquel límite, ya no era exacta dicha aproximacion. Snell, que fué el primero en descubrir la ley, la formuló del modo siguiente: *La relacion de las secantes de los ángulos de incidencia y de refraccion es constante*, enunciado que ha sido sustituido por el que Descartes propuso en su *Tratado de dióptrica.*

*incidencia y de refraccion de dos medios determinados es un número constante, cualquiera que sea la incidencia.*

Las leyes que acabamos de estudiar indican el camino que sigue la luz cuando el haz luminoso pasa de un medio á otro; pero esta marcha, como lo demuestran el raciocinio y la práctica, es igual si la luz pasa del segundo medio al primero. Entónces el rayo incidente viene á ser el refractado y recíprocamente. Por ejemplo, si el punto luminoso está en el agua en S (fig. 62) el rayo que cae en el punto I de la superficie se desviará de la perpendicular siguiendo la direccion I R: la direccion S I R



*Fig. 59* —Fenómenos de refraccion. Palo roto

será la misma en sentido inverso que si el rayo incidente hubiera sido R I, por manera que los ángulos de incidencia y de refraccion tendrán los senos inversos, pero su relacion permanecerá siempre constante, todo lo cual equivale á decir que el índice de refraccion de un medio para otro es el inverso del índice del segundo para el primero.

Tambien se dice en términos generales que la luz que atraviesa una serie de medios trasparentes sigue siempre el mismo camino, ya se propague en un sentido, ó ya se dirija en el opuesto.

Estas leyes permiten que podamos darnos cuenta de los fenómenos que hemos descrito al principio de este capítulo. El ojo que examina el extremo de un palo sumergido en el agua lo ve por el haz luminoso que envia este extremo á la superficie, haz que se refracta y cuyos diversos rayos, tanto más desviados cuanto más oblicua es su incidencia, penetran en el ojo divergiendo. El fenómeno es, pues, el mismo que si el punto luminoso estuviese en el punto de convergencia de estos rayos (fig. 63) y el ojo ve en efecto el extremo del palo en este punto. El mismo efecto se produce respecto de todos los puntos intermedios, y el palo parece torcido ó roto.

La misma explicacion da cuenta de la eleva-

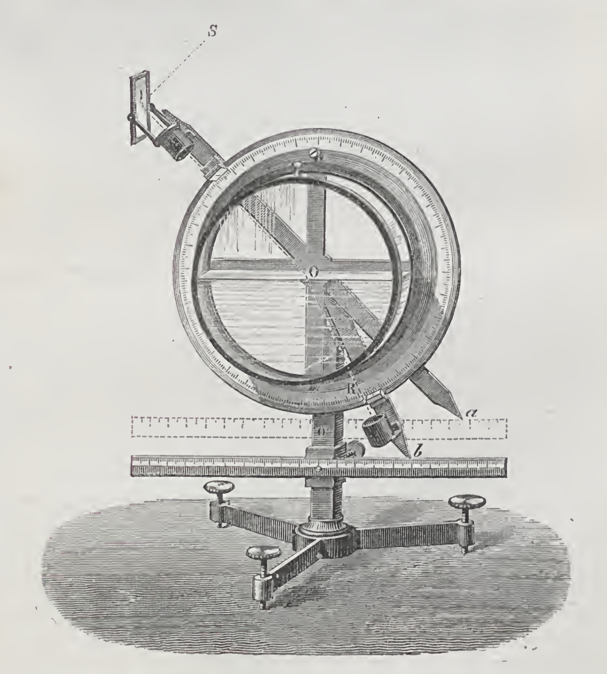



*Fig. 60.*—Demostracion experimental de las leyes de la refraccion

cion del fondo de una vasija llena de líquido, ó de la del de un arroyo ó de un rio de agua cristalina. La profundidad real es siempre mayor que la aparente, y para calcularla se debe tener



en cuenta la ilusion que resulta de la refraccion. Al mirar el fondo áun cuando sea en direccion perpendicular, se produce esta ilusion, porque el ojo no recibe un rayo único, sino un haz cuyos componentes divergen más al pasar al aire, á causa de la refraccion, que en el líquido, apareciendo el punto O en O' (fig. 64), esto es, más cerca de la superficie; lo propio sucede con todos los puntos del fondo, ora se trate de una vasija, ó bien de un rio.

## III

### FENÓMENOS DE REFLEXION TOTAL

De las leyes de la refraccion resulta un fenómeno singular, del que nos da cuenta la teoría y confirma la experiencia, y que ha recibido el nombre de *reflexion total.* Hé aquí en qué consiste el fenómeno en cuestion:

Consideremos, por ejemplo, un punto luminoso situado en el agua, en el fondo de una



*Fig. 61.* — Descartes

vasija: este punto envia rayos de luz en todas las direcciones posibles á la superficie de separacion del aire y del agua. Pero ¿todos estos rayos emergen? Ahora veremos que esto no puede ser, y que hay cierto ángulo, variable con la naturaleza del medio, más allá del cual el rayo luminoso no puede penetrar en el medio ménos refringente. En efecto, dicho rayo pasa aquí del agua al aire, de un medio más refringente á otro que lo es ménos; se separa, pues, de la normal y el ángulo de reflexion es mayor que el de incidencia. A medida que este último ángulo irá creciendo, crecerá tambien el ángulo de refraccion á su salida del agua, y por consiguiente llegará un momento en que, siendo ya recto el primer ángulo, el de incidencia no lo será todavía. A partir de este punto, de este ángulo límite, el rayo no emergerá ya, sino que rasará con la superficie horizontal del líquido. Como el ángulo de incidencia sigue creciendo, el ángulo de refraccion deberá ser más allá mayor que uno recto. En este caso el rayo vuelve al seno del líquido, y siguiendo las leyes conocidas de la reflexion, se refleja en la superficie interna de separacion. Como la emergencia no es completa en las incidencias menores y hay una reflexion parcial de los rayos, dícese que hay *reflexion total* cuando esta emergencia es nula. Todos los rayos que desde el punto luminoso cortan la superficie de separacion de los dos medios, se dividen así en dos partes; la primera, que con-

tiene los que emergen, forma el *cono de los rayos refractados*, y la segunda se compone de todos los que no pueden emerger y se reflejan en el interior del medio más refringente.

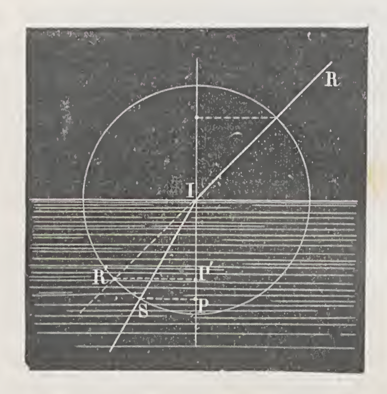



*Fig. 62.*—Ley de los senos

Llámase *ángulo límite* aquel más allá del cual empieza la reflexion total, y su valor depende del índice de refraccion del medio. Así pues, el ángulo límite que es de unos 48 ½° para los rayos que se refractan del agua en el aire, es tan sólo de 41 del vidrio en el aire.

Un experimento muy sencillo permite demostrar el fenómeno de la reflexion total haciendo ver al mismo tiempo que la reflexion obtenida de tal modo excede en brillo á cuantas se obtuvieran directamente, por ejemplo, en la superficie del mercurio y de los metales bruñidos. Se llena de agua un vaso y se le sostiene de modo que la superficie del líquido esté más alta que el ojo: mirando oblicuamente la parte inferior de esta superficie, parece más brillante que la plata bruñida y dotada de brillo metálico. La parte inferior de un objeto metido en el agua se ve reflejada como por un espejo.

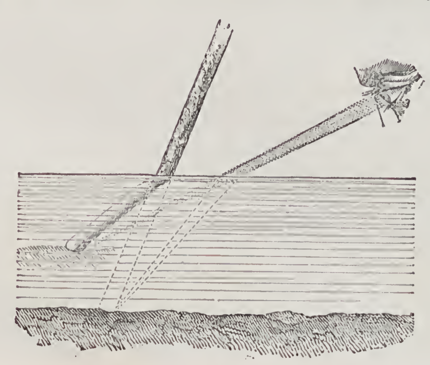


*Fig. 63.*—Explicacion del palo roto

Un buzo, sumergido en un agua perfectamente tranquila y que levante la vista hácia la superficie del líquido, será testigo de fenómenos singulares. La refraccion le hará ver en un círculo de unos 97 grados de diámetro, todos los objetos situados sobre el horizonte, tanto más deformados y estrechos, sobre todo en el sentido de su altura, cuanto más cerca estén del horizonte sensible. «Más allá de este límite, el fondo del agua y los objetos sumergidos se reflejarán y se podrán ver con tanta claridad como si se los mirara directamente. Además, el espacio circular á que nos hemos referido parecerá rodeado de un arco-íris perpetuo, débilmente colorado, pero con mucha delicadeza.» (J. Herschel.)

Tambien nos explica el fenómeno de la reflexion total en qué consiste que un prisma isósceles y rectangular de cristal, adaptado á la abertura de una cámara oscura, intercepte toda la luz procedente del exterior y deje la



*Fig. 64.*—Elevacion aparente del fondo de un rio de una vasija. Explicacion

cámara en la oscuridad más completa. Los rayos que penetran en el prisma por su cara perpendicular (fig. 65), entran en él sin refraccion, mas al llegar á la superficie oblicua, el ángulo de incidencia es de 45 grados, es decir, superior al ángulo límite; efectúase la reflexion total y no hay emergencia. Los rayos que pudieran entrar procederian de incidencias oblicuas, que intercepta el tubo opaco en el que está metido el prisma.

La figura 66 presenta un efecto curioso de iluminacion de un chorro líquido, debido á la reflexion total. Se llena de agua una vasija cilíndrica que tenga en su parte inferior un orificio

por el cual se escapa el agua formando un chorro parabólico. En la parte opuesta al orificio de desagüe hay otro cerrado con un cristal, en el cual se proyecta un haz de luz intensa concentrado por medio de una lente. El haz va á parar al interior del chorro bajo una incidencia oblicua que traspasa el ángulo límite: refléjase al principio totalmente, y luégo otra y otra

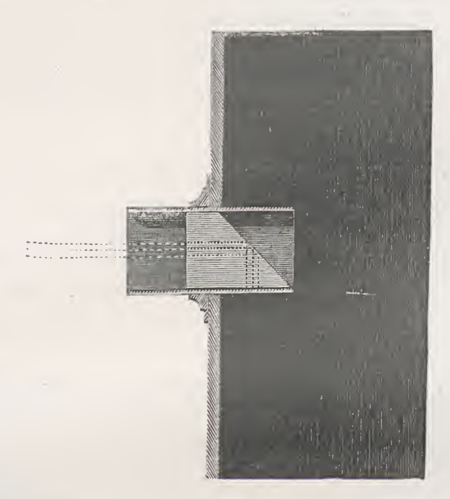


*Fig. 65.*—Fenómeno de reflexion total en un prisma rectángulo isósceles

vez á causa de la curvatura del chorro, y así indefinidamente. Merced á la interposicion de cristales de varios colores, se puede cambiar como se quiera el aspecto de esta especie de *fuente luminosa*, que se usa en el teatro en las comedias de magia.

## IV

### LA REFRACCION EN LA ATMÓSFERA

El fenómeno de la refraccion ocurre siempre que un rayo de luz pasa de un medio á otro, cuando éste difiere del primero por su naturaleza y por su densidad. Es por lo tanto evidente que los rayos luminosos emanados de los astros, Sol, Luna y estrellas, y que despues de marchar por los espacios celestes, han de atravesar las capas atmosféricas para llegar á nuestra vista, sufren una refraccion, y por consiguiente, no vemos los astros en la direccion de las líneas rectas que en realidad reunen á cada uno de ellos con la posicion que ocupamos en la superficie de la Tierra, exceptuándose únicamente los que se hallan en el zenit de cada horizonte.

La refraccion atmosférica depende de la altura angular á que se encuentra sobre el horizonte el astro observado, como tambien de la ley en virtud de la cual decrecen las densidades de las capas de aire de que se compone la atmósfera. Como los datos que tenemos acerca de esta ley son muy inciertos, hubiera sido sobremanera difícil medir directamente las desviaciones que corresponden á las diferentes alturas de los astros; mas por fortuna la astronomía ha venido en auxilio de la física. Siendo invariable la distancia angular de toda estrella al polo celeste á cualquier altura que el movimiento diurno la lleve sobre el horizonte, las diferencias que la observacion consigna entre las distancias obtenidas desde la mayor altura hasta el horizonte mismo no pueden proceder sino de la refraccion atmosférica. De aquí la posibilidad de construir una tabla de refracciones atmosféricas, desde el horizonte hasta el zenit, tabla muy útil para deducir de la posicion aparente de un astro el aumento de altura debido á la refraccion, y averiguar así su posicion verdadera.

La refraccion llega en el horizonte á cerca de 34′. Como el valor del diámetro del Sol y de la Luna es menor, resulta que en el mar, donde ningun objeto oculta el límite del horizonte, el disco del Sol aparece entero sobre la sábana líquida mucho ántes que la cúspide del astro se ostente por encima de este límite, es decir, que

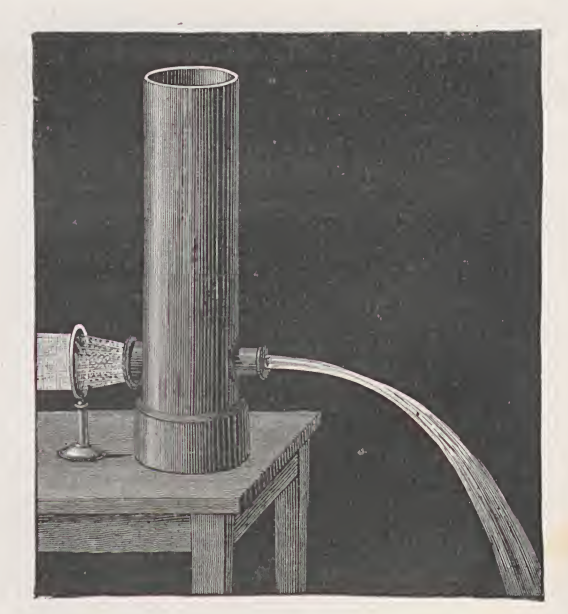


*Fig. 66.*— Fuente luminosa. Fenómeno de reflexion total

se le ve ántes de su completa salida. Por consiguiente la refraccion contribuye á alargar el dia por la mañana, sucediendo lo propio por la tarde al ponerse el Sol.

El mismo fenómeno sirve para explicar una curiosa particularidad observada en muchos eclipses de Luna, y es que este astro se ve eclipsado estando el Sol visible todavía en el horizonte occidental. Finalmente tambien es la refraccion atmosférica la que, permitiendo en los eclipses totales de Luna que cierta cantidad de rayos lleguen á nuestro satélite, impide que su disco sea completamente invisible. Este disco suele presentar entónces una marcada coloracion rojiza, semejante á la que tiene la atmósfera en el momento de ponerse el Sol.

Aquí nos limitamos á hacer algunas ligeras indicaciones sobre un fenómeno cuyo estudio es de la mayor importancia para la astronomía de observacion; pero las completaremos más adelante en la parte de este volúmen que consagraremos á la óptica meteorológica.

# CAPITULO VI

## REFRACCION EN LOS PRISMAS Y EN LAS LENTES

### I

### REFRACCION EN LAS LÁMINAS TRASPARENTES DE CARAS PARALELAS

Las leyes de la refraccion, tal como las hemos visto formuladas en el capítulo anterior, permiten resolver todas las cuestiones que tienen por objeto la marcha de los rayos ó de los haces luminosos, cuando han de atravesar medios de refringencia desigual, para lo cual basta conocer los índices de refraccion de estos distintos medios, así como la forma de las superficies de separacion. Poseyendo estos datos, las cuestiones que se han de resolver son de incumbencia de la geometría y del análisis.

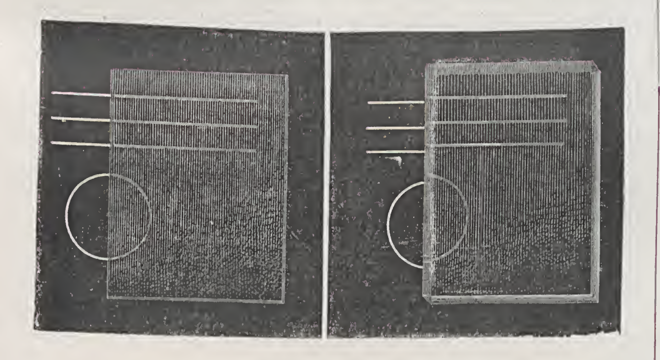


*Fig. 67.*—Desviacion debida á la refraccion á través de las láminas de caras paralelas

Como se comprenderá, aquí nos limitaremos á apuntar algunas indicaciones sobre tales cuestiones, concretándonos á las soluciones más sencillas, y recurriendo las más de las veces á la práctica para su comprobacion. Esto nos bastará para la inteligencia de las aplicaciones de la óptica, ya por lo que respecta á los instrumentos más usados, ó bien por lo que se refiere á la explicacion de los fenómenos naturales que dependen de la refraccion.

Ante todo veamos lo que ocurre cuando un rayo de luz penetra en láminas refringentes terminadas en superficies planas y paralelas. Cuando se examina un punto luminoso á través de una lámina de sustancia trasparente, verbigracia, de vidrio, cuyas dos caras planas son paralelas, si el ojo y el punto están en una misma perpendicular á la lámina, se ve el punto luminoso en la direccion exacta en que se le veria sin interposicion de ningun medio refringente; lo cual consiste en que no hay refraccion para los rayos normales.

Pero no sucede la mismo con respecto á la incidencia oblicua, pues en este caso se desvia el punto luminoso, desviacion que se puede demostrar de un modo muy sencillo. Tómese al efecto una lámina de vidrio, colóquesela sobre un papel en el que haya trazadas líneas rectas y curvas de modo que la lámina sólo las cubra en parte, y mirando perpendicularmente se observará que las líneas vistas por trasparencia son continuacion de las vistas directamente. Si se mira en direccion oblicua, se notará una desviacion, una solucion de continuidad tanto más marcada cuanto más oblicua sea la incidencia de los rayos luminosos. Esta desviacion se debe á la refraccion y crece tambien con el grueso de la lámina trasparente.

De aquí resulta con toda evidencia que las

láminas trasparentes, como por ejemplo, los vidrios, los cristales de los cuadros, etc., deforman las imágenes, puesto que los rayos que llegan á la vista desde varios puntos del cuadro

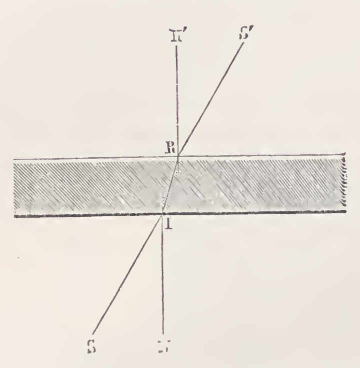


*Fig. 68.*—Marcha de un rayo luminoso á través de una lámina de caras no paralelas

han atravesado el espesor del cristal con incidencias muy distintas; los unos perpendicular y los otros oblicuamente. La desviacion, nula para los primeros puntos, no lo es para los últimos. Si el cristal trasparente fuese muy grueso, la desviacion se veria á primera vista, pero dado el espesor que suelen tener, ésta es casi imperceptible.

Por lo demás, cuando hablamos de desviacion, mejor debiéramos decir dislocacion lateral, porque el rayo luminoso que atraviesa una ó muchas láminas de caras paralelas conserva despues de su emergencia una direccion paralela á la del rayo incidente, como lo demuestra con bastante evidencia la figura 68. Esta propiedad es consecuencia del paralelismo de las normales, en los puntos de incidencia y emergencia, y tambien de las leyes de refraccion para dos medios de refringencia dada. La experiencia demuestra que los rayos son siempre paralelos

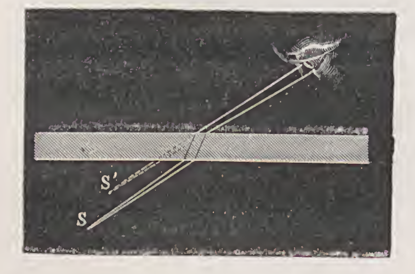



*Fig. 69.*—Marcha de un haz luminoso

cuando salen despues de atravesar cierto número de láminas, aunque estas no estén compuestas de sustancias idénticas ni tampoco situadas paralelamente; y la teoría hacia ya prever este resultado. Finalmente, otro tanto acontece cuando las láminas de sustancias diferentes están contiguas. En todo caso, la dislocacion lateral depende de la refringencia de las sustancias y del grueso de las láminas.

Si se pone una bujía enfrente de un espejo,

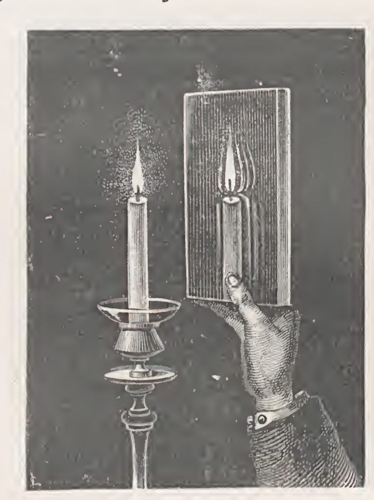


*Fig. 70.*—Imágenes múltiples producidas por la refraccion en las láminas de caras paralelas

y el observador se coloca oblicuamente para examinar la imágen de aquella, verá delante de la imágen brillante formada en la cara interior azogada, otra mas tenue procedente de la cara exterior de la luna, y además una serie de imágenes todavía más débiles situadas detrás de la primera. Estas últimas se deben á los rayos, que despues de refractarse una vez en el espesor de la lámina, resultan reflejados parcialmente por la cara azogada y por la interior de la superficie externa del espejo. La figura 71, que representa la marcha sucesiva de estos

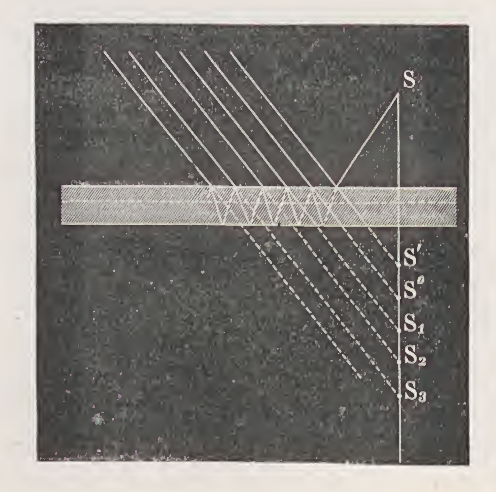



*Fig. 71.*—Marcha de los rayos que producen las imágenes múltiples de las láminas de caras paralelas

rayos, hace patente el fenómeno que acabamos de describir, y cuya demostracion es fácil. S' es la imágen del punto S formada por la re-

flexion directa de la superficie anterior no azogada; S″ es la imágen más brillante que procede de la reflexion en la cara azogada; el haz que la forma se ha refractado á su entrada en el cristal, se ha reflejado por completo y ha

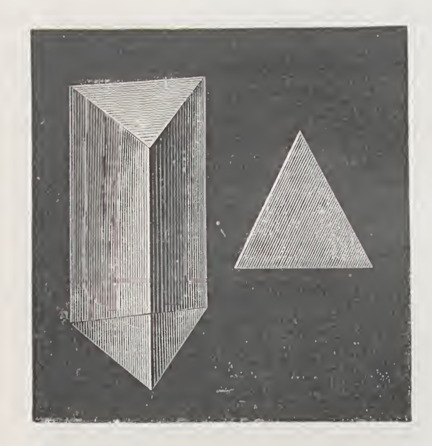


*Fig. 72.*—Forma geométrica del prisma

vuelto á salir despues de una nueva refraccion; pero en esta salida sólo ha emergido una parte de los rayos de regreso; los otros se han reflejado en la cara interna de la superficie exterior del cristal, y así sucesivamente, resultando de aquí las imágenes sucesivas, pero muy debilitadas, del punto luminoso, las cuales son tanto más distintas cuanto más oblicuamente se las mira; el observador sólo veria una si se situara perpendicularmente enfrente del punto.

## II

### REFRACCION EN LOS PRISMAS

Examinemos ahora los fenómenos que dependen de la refraccion de la luz cuando atraviesa un medio refringente cuyas caras planas no son paralelas, es decir, los *prismas*.

La figura 72 representa en perspectiva y en corte la forma geométrica del prisma tal y como se usa en óptica. Para hacer los experimentos se le suele montar sobre un pié, de modo que se le pueda girar como se quiera (fig. 73); con este objeto, el eje alrededor del cual está sujeto paralelamente á su arista, remata en un boton merced al cual se da vuelta al prisma sobre dicho eje, y hace que sus caras tomen todas las inclinaciones apetecibles. El pié está á su vez provisto de una charnela alrededor de la cual se puede mover el prisma, dándose tambien á su arista una inclinacion cualquiera.

El efecto de un prisma sobre un rayo luminoso que penetra por una de sus caras, la atraviesa y sale por la otra cara, consiste en desviar el rayo hácia la parte de la base. Basta examinar la figura 74 que representa la marcha de los rayos incidentes y refractados para patentizar este fenómeno; el rayo incidente SI, despues de sufrir una refraccion, recorre en el prisma el camino IE, se refracta de nuevo al salir del prisma, y por último emerge en la direccion ER. Así lo confirma la observacion, pues si se examina un objeto con un prisma, colocando su arista en posicion horizontal, se ve que la imágen aparece levantada si la base es inferior; y más baja, si la base ocupa la posicion opuesta.

Y en efecto, el ojo ve el punto luminoso en la direccion de los rayos que penetran en su interior y en el punto de su convergencia. Si, segun acabamos de ver, el haz diverge acercándose á la base del prisma, se efectuará su convergencia hácia la parte del vértice, y el ojo verá el punto alto ó bajo segun que la base esté encima ó debajo de la arista (fig. 75). La desviacion es tanto mayor cuanto más considerable el ángulo del prisma, si permanece constante el de incidencia de los rayos. En un mismo prisma crece el ángulo de emergencia á medida que el rayo incidente se aproxima á la normal, y hay

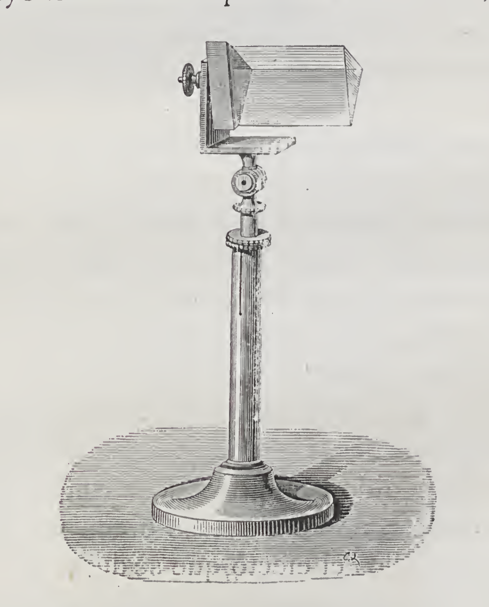


*Fig. 73.*—Prisma montado sobre un pié

una direccion en la cual se llega al ángulo límite de la reflexion total. En este caso ya no hay emergencia, lo cual depende, por otra parte, de la sustancia de que se componga el prisma: si se trata de uno de vidrio de 45°, no puede salir ningun rayo luminoso que caiga por encima de

la normal hácia el lado del vértice; pero los que caen hácia el lado de la base dan rayos emergentes. Un prisma cuyo ángulo excediera del doble del ángulo límite (82° para el vidrio), cuya base se ennegreciera y al que se colocara trasversalmente á la entrada de una cámara oscura de modo que la tapase, no dejaria penetrar en el interior ningun rayo de luz.

Más adelante describiremos los fenómenos de coloracion que se observan en los haces luminosos desviados por los prismas: estudiemos ántes la marcha de la luz cuando atraviesa medios refringentes terminados en superficies curvas.

## III

### REFRACCION DE LAS LENTES

Si se corta de un pedazo de vidrio ó de otra sustancia refringente, un disco cuyas dos caras sean convexas y tengan la forma rigurosa de dos porciones de esfera, se tiene lo que se llama una *lente*. Conforme veremos, hay varias clases de ellas, pero la que acabamos de describir es la que forma el instrumento llamado *cristal de aumento*, tan usado por muchas personas, como naturalistas, grabadores, relojeros, etc., que tienen precision de ver con mayor número de detalles las partes más diminutas de los objetos.

Parece indudable que las lentes de vidrio y sus efectos amplificadores se conocen desde hace mucho tiempo: se han encontrado objetos análogos cuyo empleo óptico no parece dudoso en las excavaciones de Nínive y en las de Pompeya y Herculano. En Europa se usan los anteojos desde principios del siglo XIV; pero tan sólo hace unos trescientos años que, gracias al conocimiento de las leyes rigorosas de la refraccion, han podido los ópticos construir y combinar cristales de modo que se obtenga exactamente con ellos el efecto que se desee.

Los físicos han dado por extension el nombre de lentes á todas las masas trasparentes terminadas, por una cara al ménos, en superficies curvas, esféricas, cilíndricas, etc., áun cuando estas superficies sean cóncavas en vez de convexas, como las del cristal de aumento. Por lo regular, y á ménos que se diga expresamente lo contrario, las dos superficies de las lentes son esféricas, ó bien una plana y otra esférica (así lo supondremos siempre en el curso de esta obra); pero todas ellas pueden agruparse en dos clases segun la marcha que sigue la luz que las atraviesa. Las unas, como el cristal de aumento, son *convergentes*, es decir, que los rayos luminosos se encuentran más próximos despues que ántes de su paso. Las otras son *divergentes* porque, al contrario, los rayos se separan ó divergen cuando salen del medio refringente que las forma. Por lo demás, hay un medio muy sencillo de distinguirlas á primera vista; todas las lentes convergentes son más gruesas en el

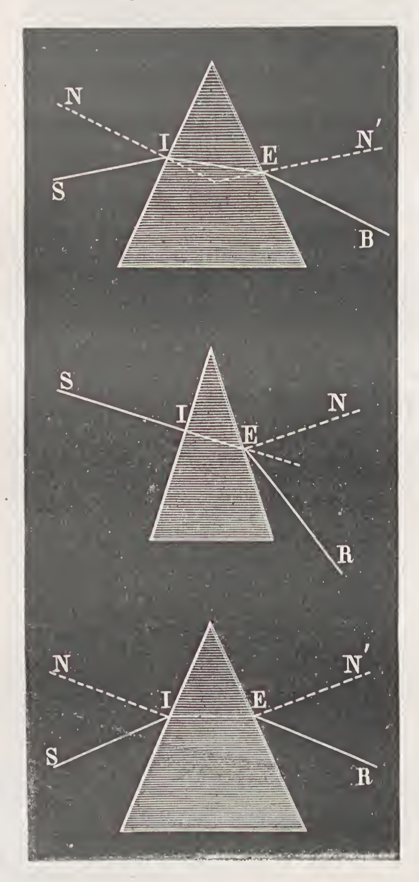



*Fig. 74.* — Desviacion de los rayos luminosos por los prismas

centro, de suerte que sus bordes son afilados: las lentes divergentes son más delgadas en el centro que en los bordes.

Hemos dicho que el tipo de la lente convergente es el cristal de aumento *biconvexo*, cuyas dos caras, por lo comun de la misma curvatura, son convexas.

Sigue luégo la lente *plano-convexa*, una de cuyas caras es plana y la otra convexa. Por último, la tercera lente convergente, es el *menisco convergente*, que tiene una cara cóncava y la otra muy convexa. En la figura 77 se representa cada una de estas lentes vista de canto, ó

mejor dicho, por su espesor, suponiéndola cortada en el sentido de uno de sus diámetros.

El tipo de las lentes divergentes es la *bicóncava*, formada de dos caras cóncavas: siguen la *plano-cóncava*, con una cara cóncava y la otra plana, y el *menisco divergente*, cuyas dos caras son una convexa y la otra de concavidad muy pronunciada.

Digamos de una vez, para no tener que volver á ocuparnos de esta clasificacion, que el *eje principal* de una lente es la línea recta indefinida que pasa por los centros de las esferas á que pertenecen sus superficies, ó si una de estas es plana, la línea que cae perpendicularmente sobre la superficie plana desde el centro de la curva. En las lentes convergentes, el eje atraviesa el cristal por su mayor espesor, sucediendo lo contrario en las divergentes.

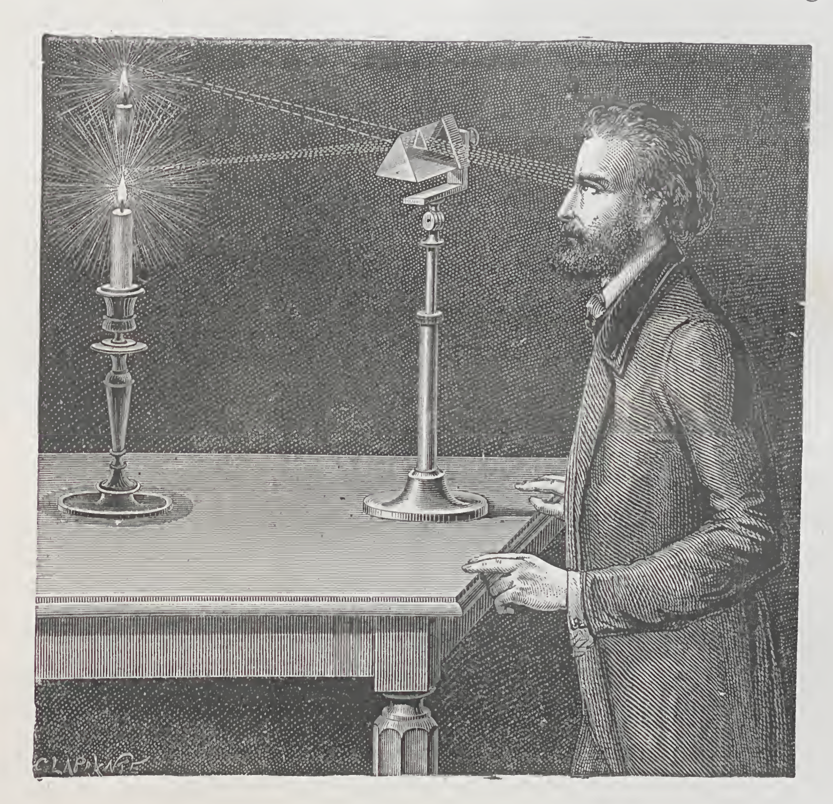


*Fig. 75.*—Imágenes de los objetos vistos á través de los prismas

Las leyes conocidas de la refraccion nos demuestran que un rayo de luz que se propaga en direccion del eje atravesará la lente sin desviarse y proseguirá su marcha siguiendo el mismo eje, exactamente lo mismo que si atravesara normalmente una lámina de caras paralelas.

Hay otras líneas que gozan de análoga propiedad, por cuyo motivo se las llama *ejes secundarios*, y son las que en las lentes bicóncavas ó biconvexas cuyas caras tienen el mismo radio de curvatura, cortan el eje en medio del espesor máximo ó mínimo: IOI' (fig. 80) es un eje secundario en cada una de las lentes representadas. Siempre que un rayo luminoso NI sigue despues de su entrada la direccion de una de estas líneas, sale en otra N' I' paralela á la del rayo incidente, y como los gruesos de las lentes suelen ser muy pequeños, puede decirse que el rayo incidente y el emergido marchan sin desviacion en la direccion del eje secundario. Dase el nombre de *centro óptico* de la lente al punto O donde concurren el eje principal y los secundarios. Si las dos caras no tienen la misma curvatura, el centro óptico sigue estando en el interior, pero no ya á igual distancia de las dos caras. El de las lentes plano-convexas y plano-cóncavas está en la superficie curva y el de los meniscos convergentes y divergentes en la parte exterior de la lente; mas al paso que en los primeros se halla hácia la parte de la cara convexa, los segundos lo tienen hácia la de la cóncava.

Suponiendo bien comprendidas estas definiciones, veamos ahora cuál es la marcha de la luz á través de una lente biconvexa.

Para esto la colocaremos al sol, de tal mane-

ra que su eje principal sea paralelo á los rayos del astro; luégo, recibiendo la luz que sale de la

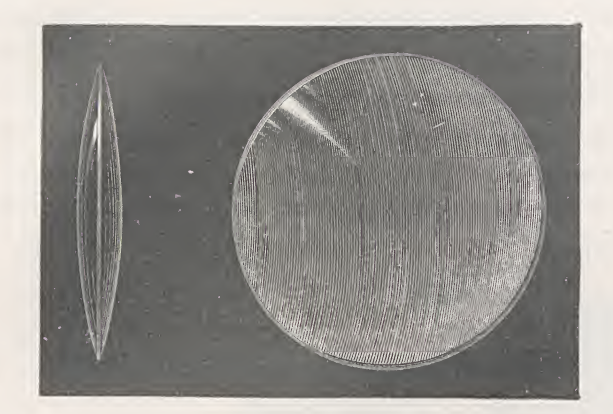


*Fig. 76.*—Anteojo ó lente de caras convexas

lente sobre una pantalla colocada al lado opuesto y á cierta distancia, percibiremos un círculo luminoso, cuya pureza y dimensiones dependen de la distancia de la pantalla á la lente. Retirándola ó aproximándola poco á poco, acabaremos por encontrar una posicion tal que el brillo de dicho círculo llegará á su mayor esplendor, su pureza mayor y sus dimensiones más reducidas: seria un punto matemático si el foco luminoso fuese asimismo un punto. Este punto, al cual van á converger (1) despues de su refraccion los rayos paralelos al eje principal, se llama el *foco principal* de la lente: la distancia FA del foco á esta lleva el nombre de *distancia focal principal* y depende á la vez de la sustancia que la compone (es decir, del índice de refraccion de esta sustancia) y de la curvatura de sus superficies: miéntras más pronunciada es esta última, ménos considerable es la distancia focal, lo que se expresa diciendo que la lente es de foco corto.

Si se coloca la lente en la rendija de la cámara oscura, puede observarse en el aire la marcha convergente de los rayos, pues el cono luminoso se echa de ver por la iluminacion de las partículas de polvo que flotan en la cámara.

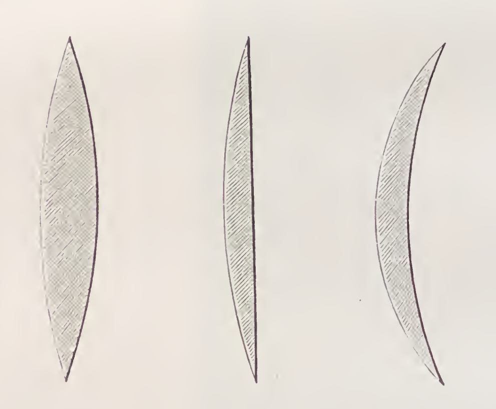


*Fig. 77.*—Lentes convergentes. Lente biconvexa; lente plano-convexa; menisco convergente

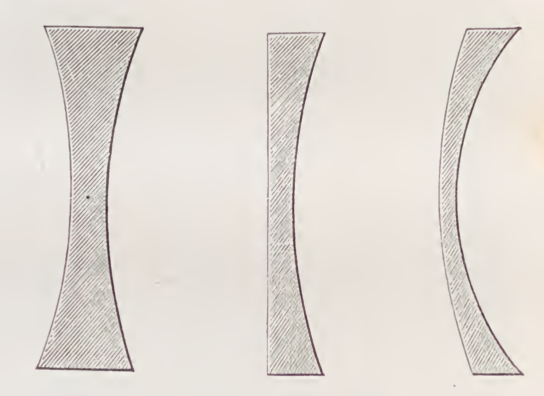


*Fig. 78.*—Lentes divergentes. Lente bicóncava; lente plano-cóncava; menisco divergente

La convergencia de los rayos luminosos producida por las lentes biconvexas se explica fácilmente comparándola con la marcha de la luz refractada á través de un prisma. Sábese que el efecto producido por este último medio consiste en desviar el rayo luminoso hácia la base del prisma. Pues bien, podemos considerar una de dichas lentes como si estuviera formada por una serie de prismas superpuestos, cuyo ángulo es tanto más agudo cuanto más se aproximan al eje principal, siendo la desviacion más considerable tambien segun que el ángulo sea de mayor abertura. La figura 82 basta para dar cuenta de la convergencia de los rayos, y la práctica juntamente con la teoría demuestran que el punto de reunion está en el eje principal, con tal que los rayos pasen muy inmediatos al eje.

Examinemos las diferentes circunstancias que se presentan cuando el punto luminoso S se acerca progresivamente á la lente en el eje principal. La explicacion es la misma cuando los rayos luminosos en lugar de partir de un punto situado á una distancia infinita, proceden de una luz situada en el eje á una distancia finita; sólo que en este caso el foco no coincide con el foco principal. Miéntras se encuentra este punto hácia un lado de la lente más allá de la distancia focal, su foco S′ se forma en el eje más

(1) La convergencia de los rayos luminosos en un mismo punto no es rigorosa sino suponiendo á la lente infinitamente delgada, y su abertura sumamente pequeña. En la práctica no existe, y la falta de concurso de los rayos es lo que se llama *aberracion de esfericidad*. Los rayos que así se cruzan, en lugar de reunirse en un punto único, forman curvas que se llaman *cáusticas*. Estas *cáusticas por refraccion* son análogas á las de los espejos esféricos, ó *cáusticas por reflexion*.

allá del foco principal, y miéntras más se aproxima, más se aleja este foco. Cuando sólo se halla separado de la lente el doble de la distancia focal, el foco correspondiente se encuentra precisamente á la misma distancia. Si se acerca aún á la lente, el foco continúa alejándose con

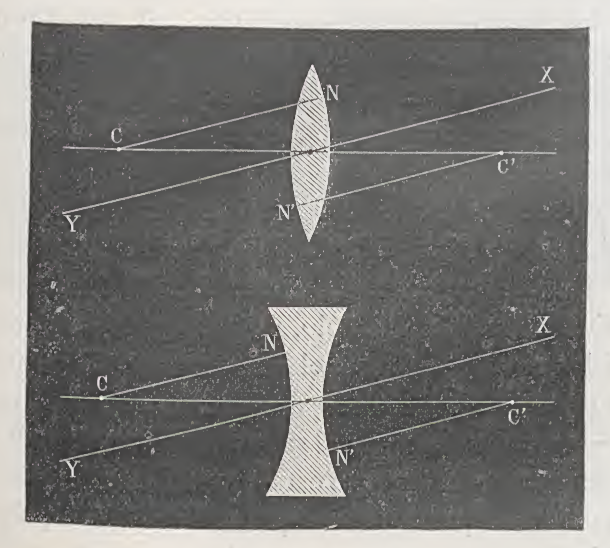



*Fig. 79.*—Eje principal y eje secundario. Radios de curvatura de las lentes

rapidez, hasta que el punto luminoso llega á la distancia focal con toda exactitud y desaparece su foco, ó, lo que es lo mismo, se aleja al infinito.

Hasta aquí la convergencia de los rayos luminosos se efectúa en realidad despues de salir de la lente; el foco es real, de lo que podemos cerciorarnos con facilidad recibiendo el cono luminoso en una pantalla, donde los rayos concentrados producirán una imágen del objeto, un punto luminoso si este objeto lo es. Además, los dos puntos del eje en donde se encuentran el objeto por una parte y el foco por otra, son recíprocos entre sí, es decir, que si el foco S' llega á ser el punto luminoso, la posicion primera S marcará el nuevo foco (fig. 83). Por esta causa dan los físicos á tales puntos, que se determinan por el cálculo cuando se conoce la distancia focal principal, el nombre de *focos conjugados*. Al tratar de los espejos hemos visto que ocurria el mismo caso.

Prosigamos nuestro estudio.

El punto luminoso S parte del foco principal y se acerca á la lente; su distancia es menor que la focal (fig. 84). Entónces los rayos luminosos se alejan del eje ó divergen despues de su emergencia, de suerte que ya no hay foco real; pero el haz divergente prolongado hácia el mismo lado que el objeto converge todavía en el eje, donde forma un foco virtual S'. Entónces ya no es posible recoger este haz en una pantalla, pero el ojo recibe los rayos luminosos como si emanaran de este foco, y la impresion que siente es la que le produciria una imágen del punto luminoso formado en S'. Cuanto más se acerca el objeto á la lente, más se aproxima tambien la imágen, y al llegar el objeto á ponerse en contacto con la superficie trasparente, la imágen llega al mismo tiempo que él.

La marcha de los rayos luminosos en una lente plano-convexa ó en un menisco convergente es la misma que en la lente biconvexa, y únicamente varía la distancia focal con la forma, el grado de curvatura y el espesor.

## IV

### IMÁGENES FORMADAS POR LAS LENTES

Todos estos resultados se demuestran por el cálculo, pero la práctica puede hacerlos patentes, y así lo efectuaremos examinando las imágenes reales y virtuales que se forman en los focos de una lente biconvexa ó, hablando en general, de una lente convergente, cuando se la pone delante de un objeto luminoso.

Hemos visto ya cómo se forma la imágen de un objeto cuya distancia puede considerarse como infinita y que envia á la lente un haz de rayos paralelos; por esto el Sol da una imágen en el foco principal de la lente. Si el objeto A B está á una distancia finita, pero superior al doble de la distancia focal principal, la imágen *ab*

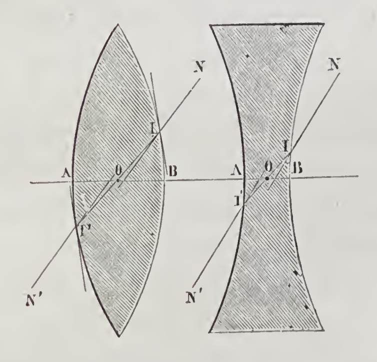



*Fig. 80.*—Ejes secundarios de las lentes. Centro óptico

se formará más allá del foco (fig. 85); será real, invertida y más pequeña que el objeto. Valgámonos de una bujía para hacer el experimento, y recibamos la imágen en una pantalla que acercaremos ó alejaremos de la lente, hasta que adquie-

ra toda la pureza apetecible. Cuanto más disminuye la distancia de la bujía, más se alejará y se agrandará la imágen, siempre real, hasta que sea precisamente igual al objeto mismo.

Si en este instante se miden las distancias que hay de la lente á la pantalla y á la bujía,

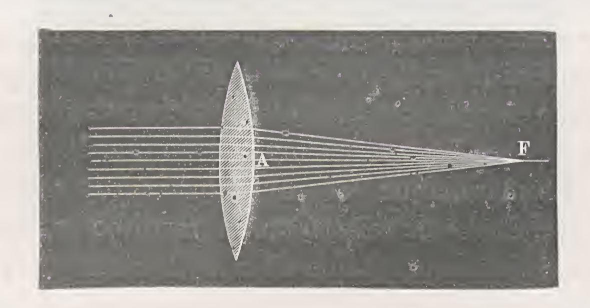



*Fig. 81.*—Marcha de los rayos paralelos al eje. Foco principal

se ve que son iguales entre sí, y cada una de ellas el doble de la distancia focal principal; si se continúa acercando la bujía á la lente, la imágen real se agranda y aleja, siendo por tanto sus dimensiones mayores que las del objeto (figs. 86 y 87): es menester alejar cada vez más la pantalla para recibir la imágen con pureza; pero entónces se observa una disminucion en su brillo que se explica por la dispersion de los rayos luminosos salidos de la lente, en una superficie que crece con más rapidez que la cantidad de luz que recibe.

Cuando llega la vela á la distancia focal, la imágen desaparece, lo cual se comprende fácilmente, puesto que saliendo entónces los rayos paralelamente al eje, ya no hay convergencia. Hasta aquí la imágen ha sido siempre real, ó en otros términos, no ha habido dificultad para recibirla en la pantalla; tiene una existencia independiente del observador; pero no sucederá lo propio si seguimos acercando la bujía ó cualquier otro objeto á la lente; porque en este caso la pantalla situada á cualquier distancia no recibirá ni reflejará más que luz difusa. Pero si en el sitio de la pantalla ponemos nuestro propio ojo, veremos á través de la lente una imágen de la bujía, que ya no estará invertida, sino derecha y ampliada. ¿En qué consiste que el ojo reciba la sensacion de una imágen que ya no tiene nada de real? No es difícil de comprender: los haces luminosos que cada uno de los puntos del objeto envia entónces á la lente, salen divergiendo del medio refringente; el ojo que los recibe experimenta la misma sensacion que si fuesen rayos emanados directamente de puntos luminosos situados al otro lado de la lente, pero á mayor distancia que el objeto á que pertenecen. De aquí resulta la amplificacion de las dimensiones aparentes, y tambien la posicion de la imágen, que, siendo ya virtual, deja de estar invertida (fig. 88). En este caso, á medida que se acerca el objeto á la lente, va disminuyendo la imágen hasta que, tocando ésta una de sus caras, se hace sensiblemente igual á aquel.

Esto por lo que respecta á las imágenes producidas por las lentes convergentes.

Las divergentes no tienen foco real: si consideramos, por ejemplo, un haz de rayos paralelos al eje, — ó sea el caso en que el punto luminoso está situado á una distancia infinita, —los rayos divergen al salir de la lente; su punto de reunion F (fig. 89) está situado en el eje delante de aquella; es lo que se llama foco principal, foco que ya no es real, sino virtual. El ojo, que recibe el haz luminoso al salir de la lente, experimenta la misma sensacion que si en realidad hubiera un punto luminoso en el foco.

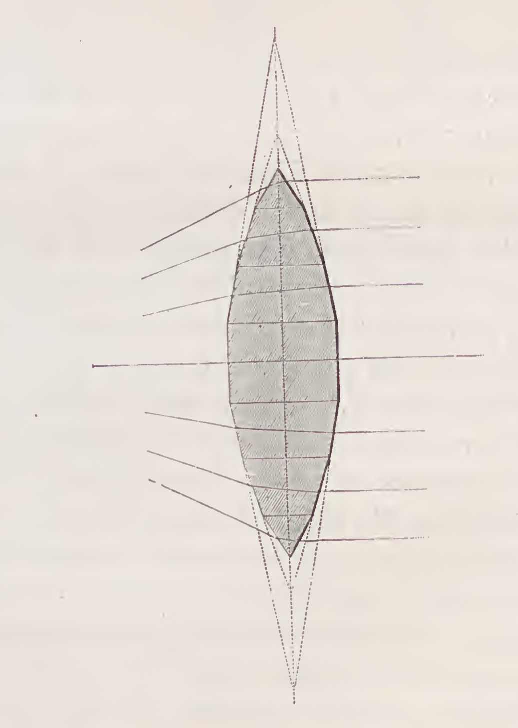


*Fig. 82.*—La lente considerada como un compuesto de prismas

Con las lentes divergentes tampoco hay nunca imágen real, por la razon de que alejándose unos de otros los rayos luminosos al salir del medio refringente, no tienen punto efectivo de reunion. Pero aplicándoles lo que acabamos de

decir respecto al caso en que la imágen dada por una lente convergente es recta y virtual, se comprenderá que las de las lentes divergentes serán asimismo rectas y virtuales. La figura 90 demuestra la razon de este último hecho, permitiendo comprender porqué las imágenes, que son tanto más pequeñas cuanto más distante se halla el objeto, acaban por tener el tamaño de éste cuando llega á tocar la lente.

El uso de las lentes convergentes ó divergentes en los experimentos de física ó su aplicacion á los instrumentos de óptica, requiere que se conozca su foco ó su distancia focal principal. Hay fórmulas mediante las cuales se puede calcular esta distancia cuando se conoce el índice de refraccion que compone la lente, así como los radios de curvatura de las superficies que la terminan; pero tambien se puede determinar esta distancia focal por medio de experimentos muy sencillos, si no muy exactos.

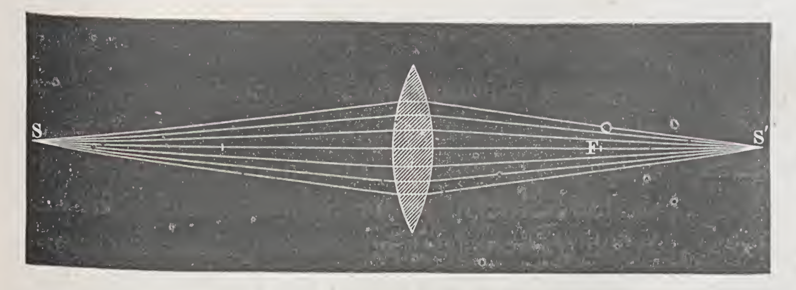



*Fig. 83.*—Marcha de los rayos emanados de un punto luminoso sobre el eje. Focos conjugados

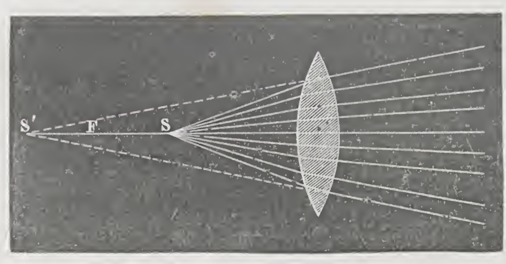



*Fig. 84.*—Marcha de los rayos emanados de un punto situado entre el foco principal y la lente. Foco virtual

Véase cómo se procede cuando se trata de una lente convergente: se reciben los rayos del Sol paralelamente al eje, y luégo, con una pantalla que se acerca ó se aleja, se busca la posicion en la que la imágen circular proyectada en ella es lo más pequeña posible. Cuando se ha dado con esta posicion, la pantalla se encuentra precisamente en el foco principal.

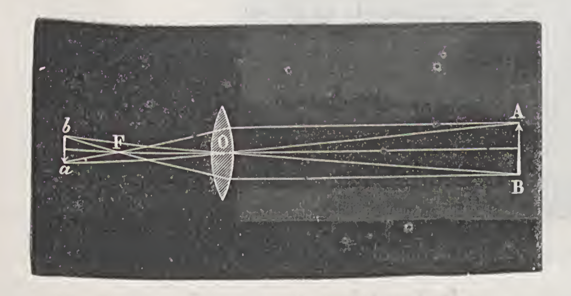



*Fig. 85.*—Imágen real, invertida y menor que el objeto

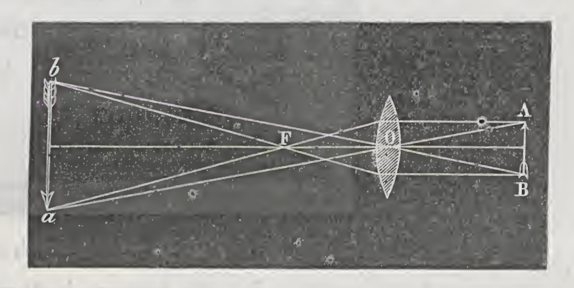



*Fig. 86.*—Imágen de un objeto situado á una distancia mayor de la lente que la distancia focal principal, y menor que el doble de esta distancia

Tambien se puede apelar á otro medio. Se proyecta en una pantalla la imágen real de un objeto formado con auxilio de una lente, y se desvia la pantalla ó el objeto hasta que sus dimensiones sean iguales. Hemos visto que, en este caso, uno y otra están á la misma distancia de la lente, distancia que es doble de la focal principal. Tendremos, pues, esta última midiendo el intervalo comprendido entre el objeto y su imágen y tomando la cuarta parte.

Si se trata de una lente divergente, se cubre su superficie con un pedazo de papel negro ó con negro de humo, y se hacen dos agujeritos en un mismo círculo máximo de la superficie y á igual distancia del eje (fig. 91). Dirigiendo entónces los rayos solares sobre la lente, se busca con una pantalla la posicion en la cual los dos haces divergentes IS, I'S', que pasan por los agujeros, dejan huellas S y S' cuya distancia es el doble de la de los agujeros. El intervalo OB comprendido entre la pantalla y el centro óptico de la lente es sensiblemente igual á la distancia focal buscada.

# CAPÍTULO VII

## DISPERSION DE LA LUZ

### I

### DESCOMPOSICION DE LA LUZ SOLAR POR LA REFRACCION

El paso de un haz luminoso de un medio refringente á otro medio, no tan sólo produce, cuando la incidencia es oblicua á la línea de separacion, el fenómeno de desviacion que acabamos de estudiar con el nombre de *refraccion simple*, sino que por lo regular va acompañado de modificaciones que influyen en el color de la luz trasmitida. Fácil es comprobar estas modificaciones, observando las imágenes de los objetos tal como se las ve al través de un prisma ó de una lente ordinaria. Ya hemos indicado que casi siempre están rodeadas de vivos colores que reproducen los matices del arco-íris.



*Fig. 87.*—Imágen real, invertida y mayor que el objeto

La coloracion de las imágenes por la refraccion es lo que se llama *dispersion de la luz*, y dimana de que la del Sol y las de los diferentes focos luminosos, directos ó secundarios, no son por lo comun luces simples ú homogéneas, sino que en realidad se componen de una multitud de rayos, cada uno de los cuales tiene un grado particular de refrangibilidad: al pasar á través de un medio refringente se descomponen; los rayos desigualmente refrangibles se dispersan, y cada uno de ellos aparece entónces con su color propio. De aquí resulta el fenómeno que vamos á estudiar y que se conocia hacia mucho tiempo por varios de sus efectos, cuando Newton descubrió su causa y formuló su ley.

Diariamente se ofrece á nuestra vista la dispersion de la luz blanca por refraccion mediante un gran número de fenómenos que los antiguos conocieron sin duda como nosotros (1), pero sin sospechar su causa. Las piedras preciosas, los diamantes lanzan destellos de varios colores, no siendo una de las menores bellezas de tan preciosas sustancias la que procede de la descomposicion de los rayos luminosos á través de sus facetas. El arco-íris es un fenómeno debido á igual causa, como lo demostraremos al describir los meteoros. Lo propio su-

(1) Séneca se esfuerza por buscar una explicacion del arco-íris y de sus colores en el primer libro de sus *Cuestiones naturales*. A vueltas de una disertacion un tanto larga y difusa enumera algunos hechos de observacion que prueban que en la época en que escribia el filósofo romano se conocian muchos efectos de la reflexion, de la refraccion y de la dispersion de la luz, los espejos cóncavos, las lentes, etc. «El agua que brota de un tubo roto, dice, ¿no presenta algo parecido á los colores del arco-íris?» Y en otra parte: «Se fabrican barritas de vidrio acanaladas ó con muchos ángulos salientes, que si reciben trasversalmente los rayos del sol, presentan las tintas del arco-íris.»

cede con esos variados colores de que aparecen teñidas las nubes y las capas atmosféricas en los crepúsculos matutinos y vespertinos. Por último, en los vasos de cristal que contienen líquidos trasparentes, en los colgantes de las arañas, se ven franjas irisadas en todas direcciones, las cuales presentan los colores más vivos en toda su pureza.

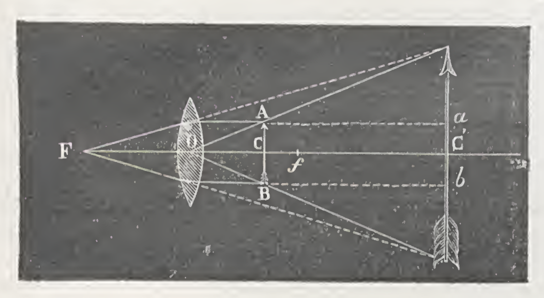



*Fig. 88.*—Imágen recta y virtual de un objeto situado entre el foco principal y la lente

Si en el interior de la cámara oscura se recibe directamente la luz solar sobre una pantalla de papel blanco, despues de haber hecho pasar un rayo del astro por un agujero abierto en la ventana, la imágen del Sol en el papel será, como ya sabemos, una mancha redonda y blanca. Pero esta luz blanca no es simple, sino un compuesto de multitud de colores ó matices que son á su vez otros tantos colores simples ó compuestos, resultado que se ha puesto fuera de duda en virtud de una serie de experimentos que se han variado hasta lo sumo, y en su mayoría efectuados por Newton. Indiquemos los más concluyentes.

Se coloca en el camino de los rayos solares, despues de su paso por el agujerito de la ventana de la cámara oscura, un prisma triangular de flint-glass, por ejemplo, de modo que sus aristas estén en direccion horizontal y que el haz luminoso penetre oblicuamente por una de sus caras. Entónces se ve en la pantalla, en vez de la imágen redonda y blanca del Sol y á cierta distancia sobre el punto en que se formaba ántes de la interposicion del prisma, una faja prolongada (1) luminosa, compuesta de una serie de colores en extremo brillantes: esta faja es lo que se llama el *espectro solar*.

Véase en qué órden se suceden los colores cuando el prisma presenta su base vuelta hácia arriba, órden que seria inverso si dicha base estuviese vuelta hácia el piso de la cámara oscura:

En el extremo inferior del espectro aparece un rojo vivo, brillante y despejado, al cual sucede una tinta anaranjada, y por gradaciones insensibles un amarillo de paja magnífico: viene luégo un verde de pureza é intensidad notables, despues una tinta azul verdosa, y en seguida, un color azul oscuro hasta llegar al añil, terminando el espectro en el tono lívido del morado.

Así pues, un rayo de luz blanca se compone de la reunion de una serie de rayos coloreados de los que solamente hemos nombrado los principales, pues la degradacion de un color en el inmediato se efectúa de un modo insensible, sin que de uno á otro haya cambios bruscos ó solucion de continuidad (2).

Otro experimento prueba á la vez que un rayo de cada uno de los colores del espectro es simple y que su grado de refrangibilidad crece del rojo al morado. Este experimento consiste en dejar pasar por un pequeño agujero practicado en la pantalla, en el punto en que se forma el rojo, por ejemplo, un rayo de este color. Recibido sobre una segunda pantalla (fig. 92) forma una imágen roja en un punto que se

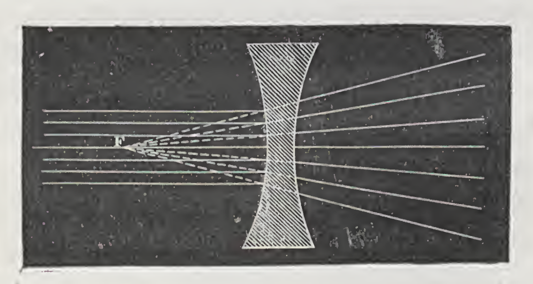



*Fig. 89.*—Foco principal virtual de las lentes divergentes

marca cuidadosamente. Si en vez de recibirlo directamente sobre esta pantalla, se interpone otro prisma, sufre el rayo luminoso una nueva desviacion, y su imágen se forma en un punto

(1) Conviene advertir que la imágen del Sol, primitivamente redonda, resulta dilatada en direccion perpendicular á la arista del prisma interpuesto: lateralmente, la faja es de anchura igual al diámetro de la imágen redonda. Si se varía la inclinacion del prisma ó la incidencia del haz, la faja luminosa y coloreada cambia de longitud; pero hay una posicion, la de la desviacion mínima, en la cual la dilatacion de la imágen solar deberia ser nula, si todos los rayos que componen el haz tuviesen la misma refrangibilidad. Pues bien, Newton ha observado perfectamente que, en semejante posicion del prisma, la prolongacion de la imágen persiste lo propio que la coloracion de sus diferentes partes.

(2) Excepcion hecha de las finísimas rayas negras de que hablaremos más adelante.

más elevado que la imágen directa; pero la nueva imágen es roja como la primera y de la misma forma si se ha situado el prisma de un modo conveniente. Por lo tanto la luz roja del espectro no puede descomponerse.

Ahora bien, el nuevo experimento, repetido con los colores sucesivos, da resultados análo-

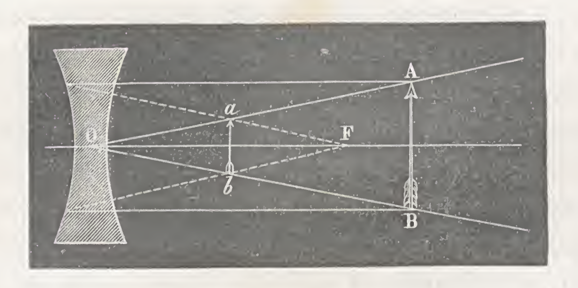



*Fig. 90.*—Imágen recta virtual y menor que el objeto en una lente bicóncava

gos; luego todos los colores del espectro solar son elementales ó simples, esto es, no pueden descomponerse. Pero su refrangibilidad es creciente, pues se observa que las distancias entre las imágenes directas de los colores en la pantalla y la imágen obtenida por la refraccion en el segundo prisma son tanto mayores cuanto más se aproxima el color á la extremidad morada del espectro. De aquí se sigue que, cuando se da el índice de refraccion de una sustancia refringente, es menester indicar á qué parte del espectro corresponde este índice; por ejemplo, el del flint pesado, que es 1,78 para el rojo del espectro, es 1,86 para el morado.

Si en lugar de un prisma de flint, se emplea otro de distinta sustancia refringente, sólida ó líquida, se obtienen espectros más ó ménos brillantes y prolongados; si los prismas son incoloros, los espectros se componen de los mismos colores, colocados en el mismo órden. Pero su proporcion y los espacios ocupados por cada uno de ellos varian con la naturaleza de la sustancia, miéntras que el órden de los colores sigue siendo el mismo. El flint-glass es de todos los cuerpos sólidos el que da un espectro de mayor extension, sobre todo en el morado, y el sulfuro de carbono tiene más especialmente esta propiedad entre todos los líquidos.

El ángulo del prisma influye tambien en la extension del espectro producido, la cual es tanto mayor cuanto más abierto el ángulo, y así se comprueba fácilmente por medio de prismas de ángulos variables.

Por consiguiente, la luz blanca se descompone por la refraccion en rayos de diversos colores, correspondiendo el de cada uno de los rayos á un grado de refrangibilidad particular.

## II

### RECOMPOSICION Ó SÍNTESIS DE LA LUZ

Si tal es en efecto la composicion de la luz, debe resultar de ello que, reuniendo en proporcion conveniente todos los colores del espectro, forme la mezcla de los rayos coloreados un haz de luz blanca. Varios experimentos confirman plenamente esta consecuencia del análisis de la luz, debiéndose la mayor parte de ellos á Newton, quien los describe en su *Optica*, y no haciéndose casi otra cosa sino reproducirlos con ligeras modificaciones en las cátedras de física.

El más sencillo de todos estos experimentos consiste en recibir en una lente convergente el espectro solar producido por un prisma. Los rayos diversamente refrangibles que componen el espectro convergen en focos distintos, pero próximos. Colocando una pantalla de papel blanco en el foco donde se reunen los diferentes rayos de color (que es el foco conjugado del punto de emergencia de los rayos del prisma) se ve una imágen blanca del Sol (fig 93). Acercando la pantalla á la lente, los rayos coloreados, que aún no se han reunido, reaparecen con tanta mayor viveza cuanto más diste la pantalla de este foco. Por el contrario, si la pantalla está muy apartada de la lente, á partir del punto de convergencia, reaparecen los colores, de modo que el rojo, que ántes se encontraba en la parte inferior, se encuentra aho-

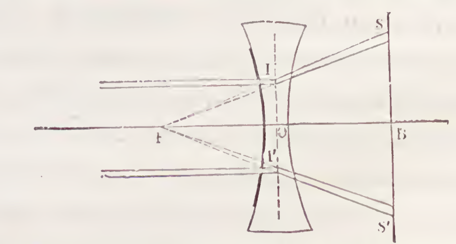



*Fig. 91.*—Determinacion experimental de la distancia focal de una lente divergente

ra arriba, y el morado, que al principio estaba arriba, se halla ahora situado abajo.

Valiéndose de dos prismas de la misma sustancia y de igual ángulo, pero colocados en posiciones opuestas, como indica la figura 94, el haz de luz blanca que cae sobre el primer pris-

ma se divide en rayos divergentes de distintos colores, pero la refraccion los vuelve á hacer paralelos al salir del segundo prisma, y entónces, en lugar de un espectro se obtiene un haz de luz blanca compuesto de la reunion de los rayos de diversos colores; sólo que el borde superior de la imágen recibida en la pantalla es rojo y el inferior morado, lo cual consiste en que, de todos los rayos de luz blanca que forman el haz, únicamente los centrales producen espectros cuyos colores se reunan en seguida, al paso que los rayos extremos del espectro no se sobreponen á ningun otro color, y la recomposicion no puede efectuarse en estos puntos.

Dos espectros obtenidos por medio de dos prismas diferentes y proyectados en sentido inverso sobre una misma pantalla, dan el color blanco en el lugar en que se sobreponen los colores.

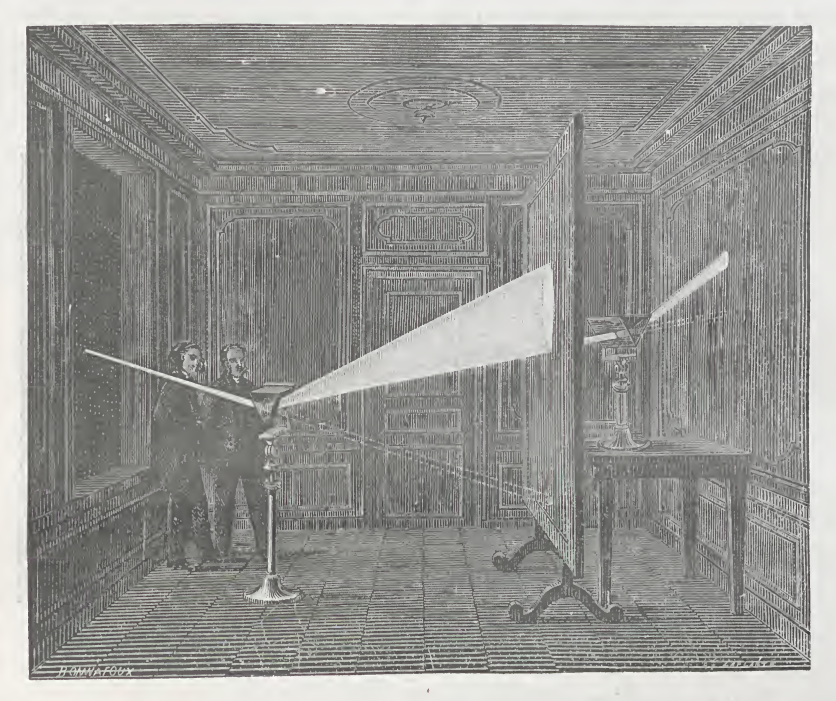


*Fig. 92.*—Descomposicion de la luz por el prisma. Desigual refrangibilidad de los colores del espectro

Observando el espectro dado por un prisma á través de otro prisma, se encuentra una posicion en la que la imágen aparece redonda y blanca.

Todos estos experimentos y otros muchos los describe Newton con claridad y sencillez admirables. «Hasta ahora, dice, he producido blanco, mezclando los colores de los prismas. Para mezclar los colores de los cuerpos naturales, nos valdremos de agua de jabon concentrada y la batiremos hasta que haga espuma. Cuando esta se haya reposado algo, bastará mirarla con atencion, y veremos entónces diferentes colores en la superficie de cada una de las burbujas de que dicha espuma se compone. Pero si nos apartamos hasta el punto de no poder distinguir los colores entre sí, toda la espuma nos parecerá de blancura perfecta.» (*Optica*, lib. I.)

Tambien procuró obtener el color blanco mezclando en varias proporciones ciertos polvos de colores. El oropimente (sulfuro de arsénico de color amarillo anaranjado), mezclado con púrpura, cardenillo y azul, le dió un compuesto de color gris ceniciento que, puesto al sol y comparado con un pedazo de papel blanco del mismo tamaño puesto á su lado y á la sombra, pareció de un blanco deslumbrador. Newton explica el color gris de esta clase de mezclas por la absorcion de la luz de los elementos, y para evitar esta disminucion de brillo juzgó oportuno iluminar fuertemente por los rayos solares aquel compuesto.

Por último, si se hace girar rápidamente un círculo dividido en sectores pintados con los colores principales del espectro, alrededor de un eje que pase por su centro (fig. 95), á medida que es más rápida la rotacion los colores desaparecen de la vista: el disco tomará un tinte tanto más blanco cuanto más cuidadosamente se haya hecho la proporcion de los colores. Se

comprende que, en este caso, las impresiones sucesivas de los distintos colores en la retina se confundan, gracias á la rapidez del movimiento, y como los rayos producen una impresion simultánea, la sensacion que resulta es el color blanco.

Cuantas luces emanan del Sol, como las de las nubes, de la atmósfera, de la Luna y de los planetas, presentan iguales fenómenos de descomposicion y recomposicion. Analizadas por medio del prisma, producen espectros de brillo muy variable, pero cuya composicion en rayos coloreados es precisamente la del espectro solar.

Las luces que proceden de otros focos, como las de las estrellas, de las llamas artificiales, del desprendimiento de electricidad, ya sea en los aparatos de física ó ya en las tormentas, dan espectros cuyos colores guardan el mismo órden que los del espectro solar. Pero, en general, el fenómeno no es tan brillante, y segun veremos en breve, sucede que faltan estos ó los otros colores, y entónces los reemplazan fajas oscuras.

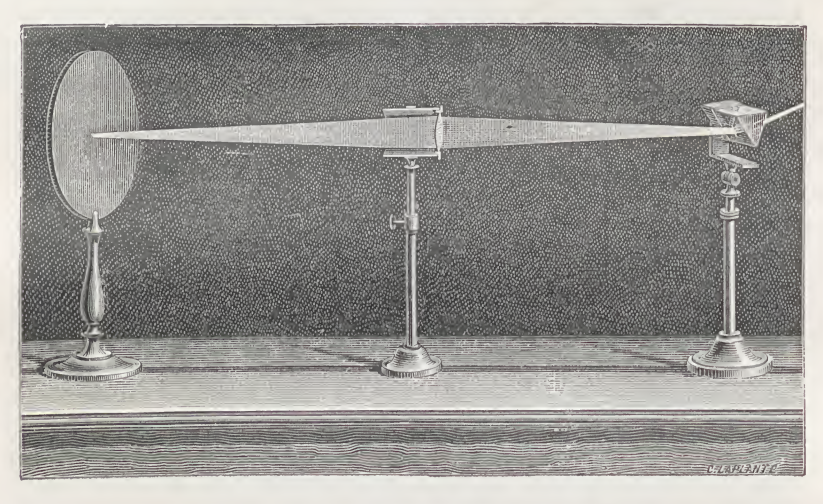


*Fig. 93.*—Recomposicion de la luz por una lente

Los experimentos que sirven para demostrar que los distintos colores del espectro dan luz blanca cuando están reunidos, son tan concluyentes cuando se emplean los rayos coloreados del espectro como cuando se hace uso de los colores de los cuerpos iluminados. Esta sola circunstancia bastaria para probar que estos últimos colores son desigualmente refrangibles, como los de los focos luminosos. Pero Newton ha hecho experimentos directos con motivo de esta diferencia. Examinó con un prisma un pedazo de papel pintado por mitad de rojo y azul, y poniendo ambos objetos delante de una ventana, como indica la figura 97, notó que las dos mitades del papel parecian desigualmente desviadas: la porcion azul resultaba trasportada algo más arriba que la roja, de suerte que el pedazo de papel parecia dividido en dos partes, una de las cuales era prolongacion de la otra. Lo contrario sucedia si el ángulo del prisma se colocaba en sentido inverso, por manera que el azul era más refrangible que el rojo.

Recibiendo detrás de una lente y sobre una pantalla de papel blanco las imágenes del mismo papel iluminado por una vela, reconoció Newton que era preciso colocar la pantalla á diferentes distancias para obtener imágenes claras de la mitad roja y de la mitad azul: una hebra de seda muy negra que daba varias vueltas al papel permitia juzgar con mayor facilidad el sitio en que se formaba con pureza la imágen de cada color, pues en los demás puntos aparecian las rayas negras mal terminadas y confusas. Para la mitad azul, la distancia de la imágen á la lente era más corta que para la mitad roja, lo cual demuestra tambien que el azul es más refrangible que el rojo. Estos dos experimentos son los primeros que Newton describe en su *Optica*.

## III

### LAS RAYAS DEL ESPECTRO SOLAR.—ANÁLISIS ESPECTRAL

José Frauenhofer, nacido en 1787 en Straubing, pequeña ciudad de Baviera, era hijo de un pobre vidriero. Al principio se dedicó á tallar el cristal, mas á fuerza de trabajo y perse·

verancia, consiguió merecer la fama de ser el óptico más entendido y hábil de nuestro siglo. No se limitó á construir los instrumentos de óptica con una perfeccion hasta entónces desconocida, sino que á fuer de observador consumado, se valió de los mismos aparatos que fa-

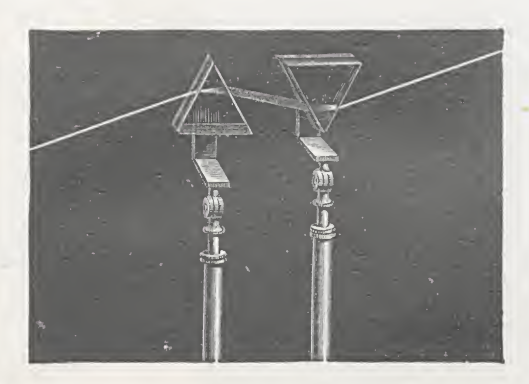


*Fig. 94.*—Recomposicion de la luz por los prismas

bricaba para hacer varios descubrimientos, entre otros el que vamos á describir y que sin disputa es uno de los más curiosos y más fecundos en consecuencias.

Al estudiar Newton las distintas partes del espectro solar, no habia podido distinguir nada que sirviera de límite preciso para sus colores, los cuales parecian fundirse unos en otros de un modo insensible y sin interrupcion aparente. Persuadido por sus experimentos de que los rayos coloreados de la luz blanca poseen, desde el extremo rojo al extremo morado, todos los grados posibles de refrangibilidad, consideraba cada uno de estos rayos como simple y homogéneo, y pensaba que la luz descompuesta por el prisma se ostentaba de un modo continuo por toda la extension del espectro.

Procurando medir los índices de refraccion de los rayos coloreados, y esforzándose por encontrar en el espectro puntos singulares á propósito para servirle de referencia, fué como Frauenhofer descubrió el hecho capital de que la luz del espectro solar no es continua, sino que está surcada de rayas finas y oscuras (1), que forman otras tantas interrupciones bruscas en la faja luminosa.

Para hacer este experimento, que requiere las precauciones más delicadas, se valió de un prisma de flint-glass de gran pureza, exento de estrías, en el cual caia el haz solar despues de pasar por una rendija paralela á la arista del prisma. Observado el espectro obtenido de este modo con una lente que aumentaba sus dimensiones vió que en vez de una faja continua en que los colores se fundian sin interrupcion, presentaba una cinta que tenia en el sentido de su anchura una multitud de rayas oscuras y hasta totalmente negras, repartidas con desigualdad en toda la extension del espectro, y cuya distribucion no parecia en relacion con las tintas de los colores principales.

Frauenhofer varió de todos los modos posibles su experimento; pero miéntras el foco luminoso de que se valió fué la luz del Sol, ora directa ó bien reflejada, aparecieron siempre las mismas líneas oscuras, conservando entre sí iguales relaciones de órden é intensidad.

Si en lugar de un prisma de flint-glass se hace uso de otro de una sustancia sólida ó líquida, únicamente las distancias de las rayas varían, pero ocupando siempre las mismas posiciones con respecto á los colores del espectro.

El ilustre óptico de Munich estudió con prolijo cuidado tan notable fenómeno; fijó con extraordinaria precision las posiciones de 580 rayas oscuras, y distinguió entre ellas ocho rayas principales para que le sirvieran de puntos

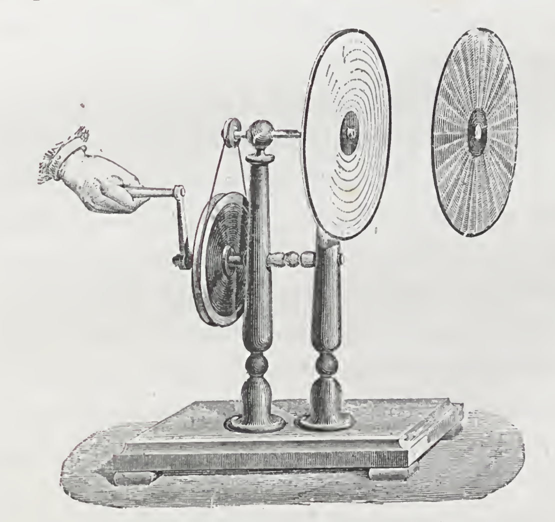


*Fig. 95.*— Recomposicion de la luz por un disco giratorio

de referencia y comparacion, designándolas con las primeras letras del alfabeto. La figura 96 representa el espectro solar con las líneas tales como se observan con un solo prisma: las rayas A, B, C están en el rojo, la primera en la ex-

(1) Wollaston habia reconocido en 1802 la existencia de dos líneas oscuras fijas en el espectro que forma un prisma de flint-glass; una de estas líneas estaba en el azul y la otra en el verde. Pero, segun lo observa Brewster en su *Tratado de óptica* «este descubrimiento no llamó entónces la atencion de nadie, y su sabio autor desistió de su estudio.»

tremidad del espectro, la segunda en medio de dicho color y la tercera á poca distancia del anaranjado: la línea doble D forma casi el límite del anaranjado hácia la parte del verde; E está en medio de este último color; F en medio del azul; G y la doble raya H están la una al final del añil hácia el azul y la otra al final del morado. Se ha designado con las letras *a* y *b* otros dos grupos de rayas, uno en el rojo y otro en el verde.

Desde 1817, época en que Frauenhofer descubrió las líneas que llevan su nombre, se han descubierto nuevas rayas, y hace algunos años se calculaba en más de 2,000 el número de aquellas cuya posicion se habia determinado. Hoy se ha duplicado esta cifra; M. Thollon, aplicando al análisis de la luz solar un espectroscopio de vision directa de su invencion (1), ha obtenido un espectro de 10 metros de largo entre las rayas A y H, en cuya extension ha podido dibujar 4,000 rayas. El espectro obtenido por Angstrom contenia 1,600 rayas en una longitud de 3 metros.



*Fig. 96.*—Espectro solar y líneas de Frauenhofer

Brewster, uno de los físicos que más se han ocupado de estas investigaciones, además de las precauciones para obtener un espectro bien claro y puro, aumentaba la sensibilidad de su vista mediante el gas amoniaco, cuya accion disolvente destruye el velo flúido que cubre la superficie del ojo.

Frauenhofer no se limitó á estudiar las líneas que rompen la continuidad de la luz en el espectro solar, sino que aplicó sus interesantes métodos de observacion á los espectros de otros focos luminosos. Como podia presumirlo, encontró al principio las mismas rayas en los focos que envian por reflexion la luz del Sol, verbigracia, la luz de las nubes ó del cielo puro, la de la Luna y de los planetas: verdad es que las rayas son en ellos de menor intensidad. Observando las estrellas más brillantes, por ejemplo, el espectro de Sirio, vió que este espectro estaba tambien estriado de rayas oscuras; pero que, siendo ménos numerosas, no están distribuidas como en el espectro solar; por otra parte, cambian tambien de una estrella á otra. Finalmente, aplicó el mismo método á la luz eléctrica, y en lugar de rayas oscuras, vió en el espectro de esta luz líneas luminosas.

Tales son los célebres experimentos que han servido de punto de partida para una serie de brillantes descubrimientos, cuyo conjunto constituye hoy una de las ramas más importantes de la óptica, y el método de análisis más ingenioso y delicado de que dispone la química. Procuremos ahora dar una idea de este método, conocido con el nombre de *análisis espectral.*

## IV

### ANÁLISIS ESPECTRAL.—MÉTODO, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE OBSERVACION

El espectro solar y los estelares están, segun acabamos de ver, surcados de rayas oscuras que indican interrupciones en la emision de la luz y prueban, contra lo que se habia creido en un principio, que en estos focos no hay rayos que posean todos los grados posibles de refrangibilidad. Lo contrario sucede con los espectros de los cuerpos incandescentes en estado sólido ó líquido, pues los espectros de sus luces son continuos.

Otros focos luminosos dan distintos resultados. Cuando se introducen en una llama artificial, por ejemplo, en la de un mechero de gas ó una lámpara de alcohol, ciertas sustancias metálicas que la elevada temperatura del foco reduce al estado de vapores, no se observan ya espectros continuos, sino algunas rayas brillan-

(1) El espectroscopio de M. Thollon tiene un poder dispersivo enorme que equivale, segun dice, al de 16 prismas de sulfuro de carbono de 60° ó al de 31 prismas de flint.

tes separadas por espacios oscuros. Así lo habia notado ya Frauenhofer.

Posteriormente se ha estudiado el mismo hecho en todas sus fases y por diferentes métodos, habiéndose reconocido que las rayas brillantes de los vapores metálicos varían en número y posicion segun la naturaleza del metal, y que su intensidad cambia tambien con la temperatura; pero, lo propio que las rayas negras del espectro solar, ocupan siempre las mismas posiciones relativas, cuya concordancia con algunas de aquellas se ha determinado.

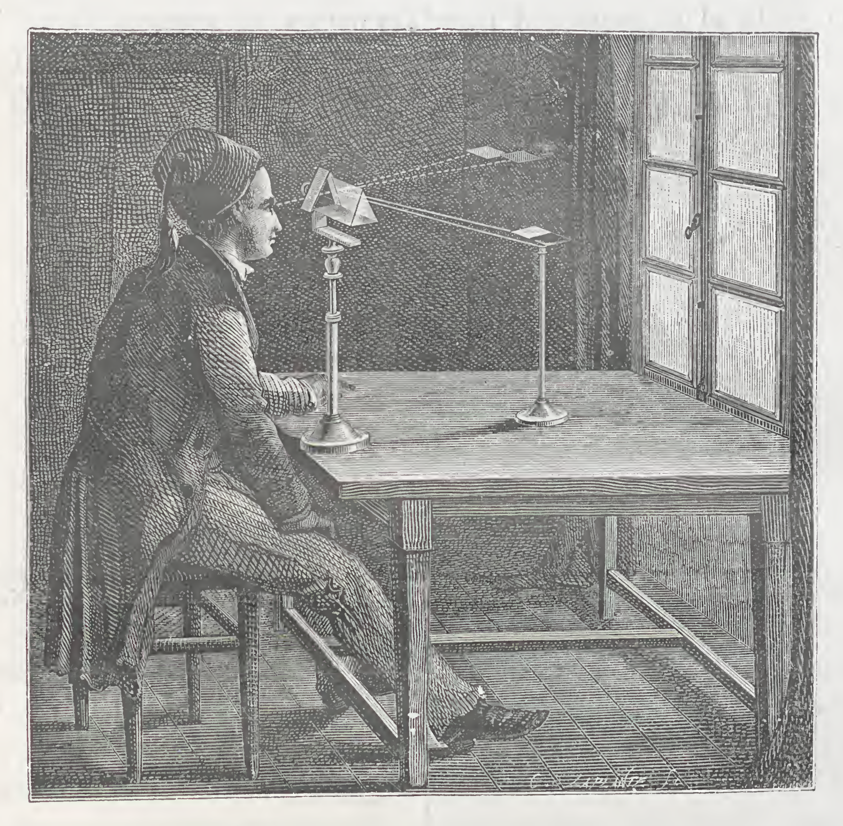


*Fig. 97.*—Refrangibilidades desiguales de varios colores

Dase el nombre de *espectroscopios* á los instrumentos que sirven para analizar los focos de luz, es decir, para estudiar la composicion de los espectros que producen estas luces, cuando son refractadas por uno ó muchos prismas.

Pero, ántes de describir los caractéres que presentan las luces emanadas de focos diferentes cuando se comparan sus espectros, cúmplenos entrar en algunos detalles sobre los procedimientos de observacion y describir los aparatos más comunmente empleados.

Las figuras 98, 100 y 101 representan un espectrocospio de un solo prisma, que es el más usado para los experimentos ordinarios. En el centro de una plataforma circular horizontal sustentada por un pié está situado verticalmente el prisma P, que por lo regular es de flint muy puro y su ángulo de 60°. Hay además dos cuerpos de anteojo C y B colocados simétricamente con relacion á las caras laterales del prisma y en la posicion de la desviacion mínimum respecto de los haces que los atraviesan y que son refractados por el prisma. El anteojo C lleva en su extremidad más apartada del prisma y en el sitio del ocular una placa metálica con una ranura que se puede ensanchar ó reducir como se quiera. Delante de esta placa A se pone el foco luminoso que se ha de analizar. Los rayos luminosos que atraviesan la ranura pasan paralelamente por un sistema de dos lentes, de suerte que es un haz vertical el que penetra en el prisma, se refracta en él, y al salir va á dar en el objetivo del anteojo B. Aplicando el ojo al ocular de este segundo anteojo puede estudiar el observador el espectro producido por la dispersion.

En E, y delante de un tercer anteojo, D, va adaptada una lámina de cristal en la cual está trazada una escala micrométrica de divisiones equidistantes muy finas: esta escala se halla colocada horizontalmente y alumbrada por una vela. Se orienta el tubo D de modo que la imá-

gen del micrómetro se reproduzca en la cara lateral del prisma de donde emerge el haz luminoso del foco, y se refleje precisamente en la direccion del eje del anteojo B.

Si, estando todo dispuesto de esta suerte, se aplica el ojo al ocular de B, se percibe con gran claridad, por una parte el espectro del foco que se estudia, con todos sus colores y rayas, y por otra la imágen del micrómetro que, sobreponiéndose á dicho espectro, lo divide por consiguiente en partes equidistantes y numeradas. Así pues, se puede anotar la posicion exacta ocupada por tal ó cual color, ó por una raya determinada del espectro observado.

Asimismo es posible comparar directamente las partes de refrangibilidad igual de los espectros de dos focos diferentes. Para esto se fija en la parte superior de la ranura del colimador C un pequeño prisma de cristal de reflexion total, que recibe lateralmente los rayos del segundo foco y los envia al eje de la lente: el haz se dispersa como el del foco colocado delante de la ranura. Entónces, aplicando el observador el ojo al ocular convenientemente graduado, ve los dos espectros dispuestos horizontalmente uno sobre otro, posicion que permite reconocer las rayas comunes ó medir la diferencia de refrangibilidad de las rayas vecinas.

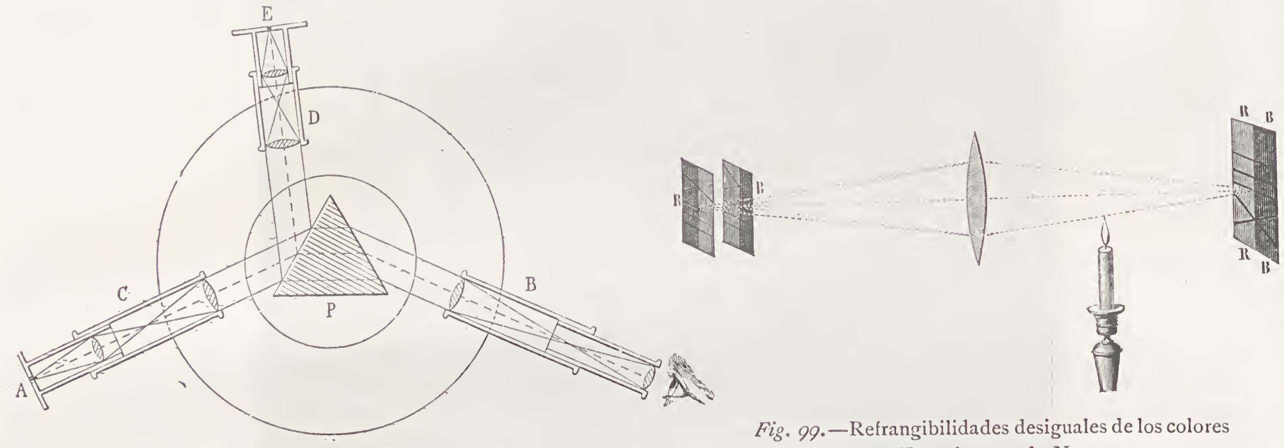



*Fig. 98.*—Espectroscopio horizontal. Marcha del haz luminoso

*Fig. 99.*—Refrangibilidades desiguales de los colores simples. Experimento de Newton

Cuando se observa, se tiene cuidado de cubrir el prisma con un tambor ennegrecido interiormente, para impedir el acceso é influencia de cualquiera otra luz: este tambor tiene tres orificios circulares que corresponden á los tres tubos del espectroscopio.

Para obtener mayor dispersion y por lo tanto espectros más extensos, merced á los cuales se pueda hacer un estudio más completo de las rayas y de sus subdivisiones, se usan espectroscopios de muchos prismas. La fig. 102 representa uno de estos aparatos en que la luz pasa á través de nueve prismas. Compréndese que el empleo de esta clase de espectroscopios se limite al análisis de luces de gran intensidad, pues al atravesar tan considerable espesor de sustancias refringentes, el haz se va debilitando á cada refraccion. Con ellos se obtiene sin duda un espectro bastante más extenso, pero tambien mucho más débil.

En los espectroscopios que acabamos de describir, los haces incidentes y emergentes forman cierto ángulo entre sí, de suerte que el observador no mira directamente el foco de luz que analiza. Pero tambien se construyen para hacer con mayor comodidad las observaciones, y principalmente las astronómicas, *espectroscopios de vision directa*, en los que un mismo tubo contiene á la vez la ranura por donde penetra la luz, el aparato dispersivo y la lente á la que va adaptado el ocular.

Entremos ahora en algunos detalles sobre los diferentes procedimientos de observacion que se emplean segun la naturaleza de los focos luminosos que se trata de analizar.

Hemos visto que la luz solar, directa ó reflejada, da un espectro de colores vivos, surcada de un número considerable de rayas oscuras más ó ménos vivas, al paso que el espectro de un líquido ó de un sólido incandescente (por ejemplo, de un baño de metal en fusion ó de un hierro hecho ascua) es absolutamente continuo. En cuanto á los gases incandescentes, el

espectro de su luz es discontinuo, y lo constituye un número ilimitado de rayas brillantes ó de fajas luminosas, separadas por anchos intervalos oscuros. Pero esto supone que la llama del gas analizado no contiene en suspension ninguna partícula sólida ó líquida; si no se llena esta condicion, si como sucede con las llamas iluminadoras de una bujía ó de un mechero de gas comun, hay partículas sólidas de carbono en el foco luminoso, entónces el espectro es

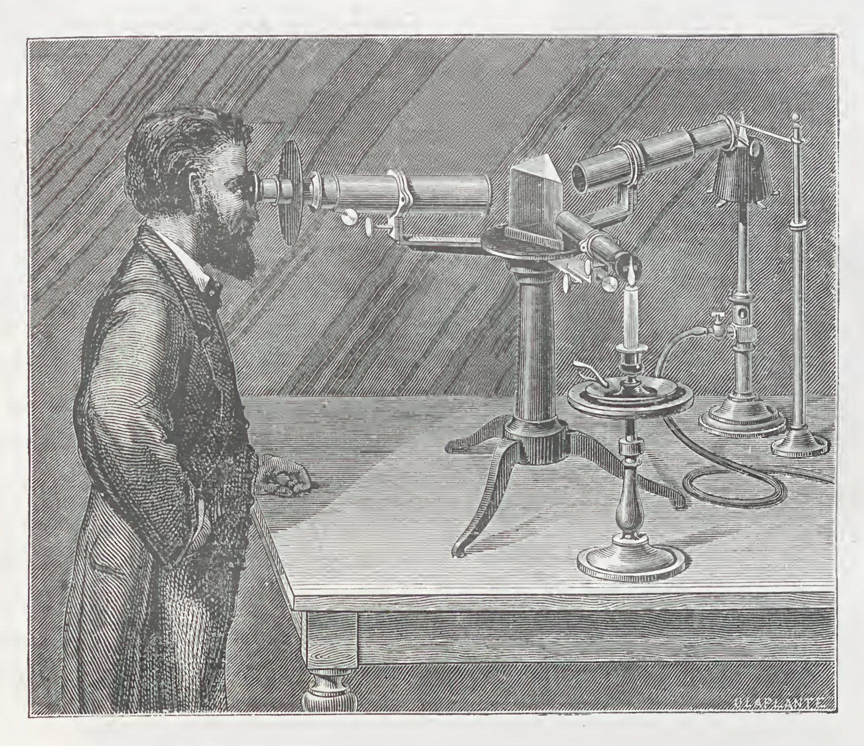


*Fig. 100.*—Observacion espectroscópica de un sólido metálico

continuo como en los sólidos y líquidos incandescentes (1). Parece, sin embargo, que esta ley tiene excepciones: por ejemplo, la llama de un mechero de gas al cual se hace llegar una corriente de aire da un espectro continuo, cuando en rigor deberia estar formado de rayas brillantes. A decir verdad estas rayas existen, pero la escasa intensidad del espectro que las hace imperceptibles, es lo que induce á creer en la continuidad. Sin embargo, precisamente esta circunstancia permite valerse de un mechero de Bunsen para la observacion espectroscópica de los cuerpos sólidos cuando estos son fácilmente evaporables, como sucede con los metales alcalinos ó térreos.

(1) Hay otros casos en que el espectro del gas no es discontinuo: si se quema en el oxígeno uno de los gases siguientes: hidrógeno, óxido de carbono, hidrógeno sulfurado, sulfuro de carbono, el espectro de sus llamas no contiene ninguna raya ni faja, brillante ú oscura. Verdad es que aquí no se trata de gases simples. Debe observarse tambien que no todo sólido incandescente da un espectro continuo. Los señores Bahr y Bunsen han reconocido que la erbina calcinada á la llama de un soplete de gas no se funde, sino que esparce una luz verde que, analizada con el prisma, da un espectro de rayas brillantes, es decir, discontinuo. El mismo fenómeno se observa con el dídimo.

Para estudiar los espectros de estos cuerpos simples, se introduce en la llama un hilo de platino impregnado de una solucion salina de

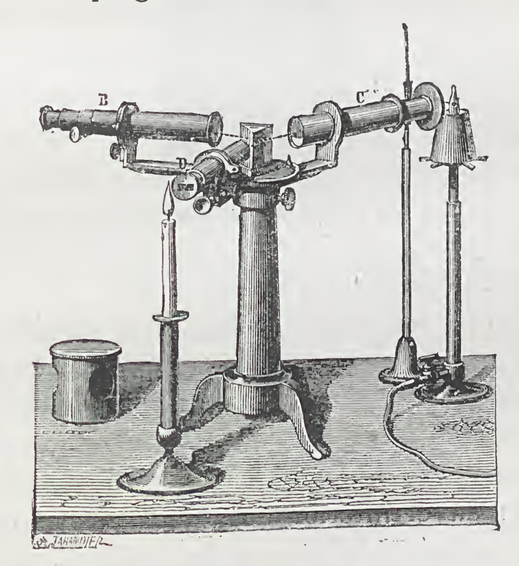



*Fig. 101.*—Espectroscopio horizontal

cualquiera de ellos. El agua empieza por evaporarse, la sal en disolucion se evapora á su vez, y se ve aparecer en el espectro las rayas características del metal.

Cuando el cuerpo se volatiliza con dificultad,

se obtiene su espectro haciendo brotar la chispa de induccion de un carrete Ruhmkorff entre dos electrodos formados por el metal en cues-

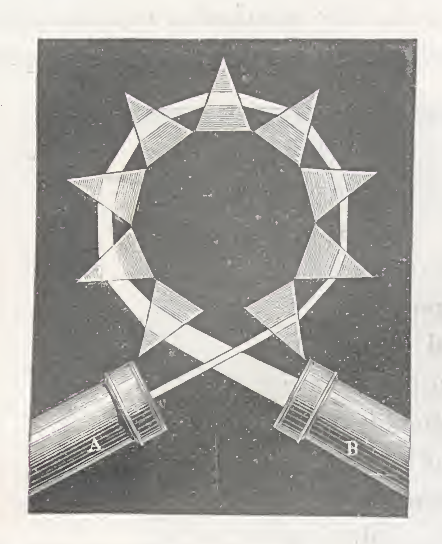



*Fig. 102.*—Espectroscopio horizontal de prismas múltiples

tion. Como la luz se produce entónces en un medio gaseoso, el espectro que se obtiene es una mezcla del espectro del gas y del del metal. Pero siendo preciso poder distinguir las rayas brillantes que pertenecen á cada uno de ellos, se ha consignado que las rayas del espectro metálico aparecen principalmente en las partes de la chispa más inmediatas á los polos; y la parte intermedia es la que con especialidad contiene las líneas del medio gaseoso.

Por lo demás, se distinguen las dos clases de rayas por medio de disposiciones particulares cuya descripcion es la siguiente: La figura 104 representa el tubo que ha ideado M. Plücker para el análisis espectral de los gases, cuyo tubo se compone de otros dos de 2 á 3 centímetros de longitud y de 5 á 10 milímetros de diámetro interior, unidos por un tubito casi capilar soldado á los dos primeros y formando con ellos ángulos más ó ménos abiertos. En los dos extremos de los tubos anchos van fijos dos hilos de platino que penetran en su interior por un extremo y salen retorcidos al exterior por el otro. Despues de hacer el vacío y de introducir el gas á la presion apetecida, por medio de un tubo lateral, se cierra éste á la lámpara. Si se ponen entónces los hilos en comunicacion con

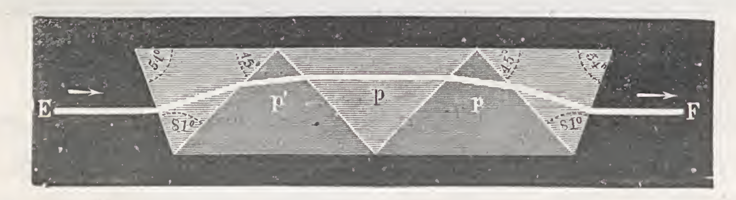



*Fig. 103.*—Disposicion de los prismas en un espectroscopio de vision directa

los polos de un carrete de induccion, se ve aparecer de un hilo á otro una luz que presenta el aspecto de una línea continua de fuego en la parte más angosta del tubo, y es la que se coloca delante de la ranura del espectroscopio. En el aparato de Geissler (fig. 105) los tres tubos son prolongacion uno de otro.

Otro sistema debido á M. Salet, consiste en un gran tubo de vidrio de 1 ½ á 2 centímetros de diámetro y de 15 á 20 de largo, cerrado por un extremo y provisto en el otro de un tapon de cautchuc con dos orificios por los cuales penetran en el interior dos tubos concéntricos que contienen los hilos de los reóforos, y además otro tubo curvo que sirve para hacer el vacío en el aparato y para introducir en él el gas que se ha de quemar. Los hilos metálicos se encorvan dentro del tubo mayor, quedando así frente á frente, de modo que poniendo sus extremos exteriores en comunicacion con los polos de un carrete ó bobina, brota la chispa y produce en el gas la luz que se observa en seguida con el espectroscopio.

Debe tenerse presente que las rayas de los principales gases simples varian en número y brillo con respecto á un mismo gas segun la cantidad de presion. La apariencia espectral varía tambien segun la temperatura del gas y segun la tension de la chispa eléctrica que produce la incandescencia (1), de suerte que la sustitucion de la bobina de Ruhmkorff por un

(1) Por ejemplo, el azufre volatilizado en un tubo de Plucker y calentado á una temperatura elevada da una magnífica luz de color azul bajo que se resolvera por el prisma en fajas muy regulares en las cuales se percibirán con un fuerte aumento rayitas negras. Si se hace comunicar cada polo de la bobina de induccion que sirve para hacer el experimento con una de las armaduras de la botella de Leiden, la chispa en el aire será más intensa; en el tubo de Plucker será más luminosa, y cambiará de color y de aspecto si se calienta algo más ó si se emplea un aparato de induccion de alguna mayor fuerza. La descarga será filiforme azul verdosa, y su espectro exclusivamente compuesto de rayas sueltas y brillantes. Obsérvanse estos dos espectros

condensador ó máquina de Holtz basta para modificar el fenómeno. Así pues para que las observaciones espectroscópicas sean comparables, es menester hacerlas en las mismas con-

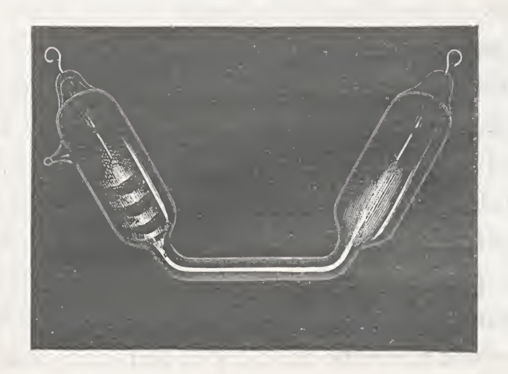


*Fig. 104.*—Análisis espectral de los gases. Tubo de Plucker

diciones físicas y con instrumentos de igual potencia.

Dejamos expuestos sucintamente los procedimientos de observacion: pasemos ahora á dar algunos detalles sobre varios de los principales resultados obtenidos.

## V

### ESPECTROS DE LOS METALES Y METALOIDES.—PRINCIPALES GASES SIMPLES.—DESCUBRIMIENTO DE NUEVOS METALES POR EL ANÁLISIS ESPECTRAL.

Acabamos de ver que, para obtener el espectro de un metal, por ejemplo el del sodio, se introduce en la llama de la lámpara un hilo de platino impregnado de una solucion concentrada de una sal cuya base la forma este metal, verbigracia, de sal marina (cloruro de sodio). Al punto se ve aparecer una raya amarilla de gran intensidad y de contornos muy marcados, que es la principal del espectro del sodio. El litio da dos rayas principales, una amarilla de




*Fig. 105.*—Análisis espectral de los gases. Tubo de Geissler

escaso brillo, y otra roja y brillante; el potasio, dos líneas características, una roja y otra violada, acompañadas de algunas amarillas y verdes; el calcio, una verde muy viva, otra anaranjada y otra azul; el estroncio, ocho rayas, seis de ellas rojas, una anaranjada y otra azul; el bario, dos verdes y otras en el amarillo y el azul; el talio, una sola, de color verde y notable por su brillo.

Del propio modo se ha estudiado un gran número de cuerpos simples, y reconocido y fijado la posicion de sus rayas brillantes, de suerte que basta examinar y comparar con los resultados de que hablamos el espectro de una llama, para que se pueda deducir de él la naturaleza de los vapores metálicos que tiene en disolucion. Como se comprenderá, de aquí ha nacido un nuevo método de análisis para la química, método tan delicado y sensible que

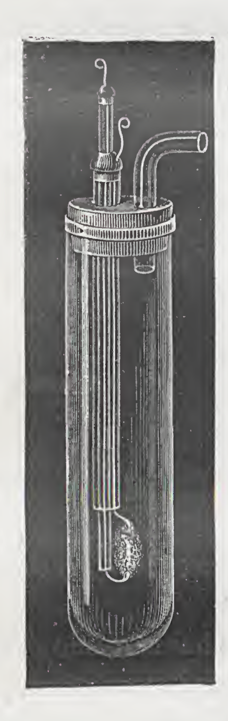


*Fig. 106.*—Análisis espectral de los gases: Aparato de Salet

basta la millonésima parte de un milígramo de sodio para que aparezca al punto la raya amarilla característica del espectro de este metal.

Dos químicos y físicos alemanes, los señores Kirchhoff y Bunsen, han hecho que el análisis espectral alcanzara un alto grado de precision desde sus comienzos.

«Preparo, dice Bunsen, una mezcla de los cloruros de los metales alcalinos y alcalino-térreos, sodio, potasio, litio, bario, estroncio y calcio, que contenga á lo sumo una cienmilésima de milígramo de cada una de estas sustancias; aplico esta mezcla á la llama, y observo el

cualquiera que sea el metal de los electrodos; son característicos del azufre en el mismo grado, pero no tienen absolutamente nada de común ni se trasforman uno en otro por una trasmision insensible.» (G. Salet, artículo *Luz* del *Diccionario de química* de M. Wurtz.)

resultado. Primeramente aparece la línea amarilla intensa del sodio en el fondo de un espectro continuo muy pálido; cuando empieza á ser ménos perceptible y se ha volatilizado ya la sal marina, se presentan las tenues líneas del potasio, seguidas de la línea roja del litio, que desaparece en breve, miéntras que las verdes del bario brillan con toda su intensidad. Entónces quedan totalmente volatilizadas las sales de potasio, litio y bario; al poco rato se muestran las líneas del calcio y del estroncio como si se disipara un velo, y adquieren paulatinamente su forma y brillo característicos.»

Por medio del análisis espectral, se comprueba fácilmente la presencia del sodio en el aire y en las partículas de polvo que tiene en suspension. La sensibilidad de reaccion de este metal es tan grande, que los observadores del espectroscopio han de tomar toda clase de precauciones para que esta reaccion no se manifieste al punto mediante la presencia de la raya amarilla en el espectro, bastando sacudir el polvo de un libro cerca del instrumento para que en el acto aparezca dicha raya.

Con este método se han descubierto seis nuevos metales; los dos primeros, el cesio y el rubidio, por Bunsen y Kirchhoff; el talio, por Crookes y Larny; el indio por Reich y Richter; el galio, por Lecoq de Boisbaudran, y el escandio por Nilson. El nombre de cesio se le ha aplicado por sus dos rayas azules; el de rubidio por las rayas rojas que caracterizan su espectro; el de talio recuerda la raya verde característica de este metal, y el de indio, una raya azul situada en el añil. El galio y el escandio (procedentes de los nombres de Francia y de Escandinavia, patrias de los descubridores) tienen, el primero dos rayas en el morado, y el segundo un crecido número de líneas, particularmente en el amarillo.

# CAPÍTULO VIII

## ANALISIS ESPECTRAL DE LOS CUERPOS CELESTES

### I

APLICACION DE LA ESPECTROSCOPIA Á LA ASTRONOMÍA: CONSTITUCION FÍSICO-QUÍMICA DEL SOL, DE LOS PLANETAS Y DE LOS COMETAS.

Hasta aquí no habia salido el espectroscopio del dominio de los laboratorios, por admirables que fuesen los progresos que merced á él habia hecho el análisis química; permitia analizar y reconocer las sustancias terrestres que podemos ver y tocar, y hasta indicaba la presencia de cuerpos que no se conocian. Pero su alcance no debia limitarse á esto: gracias á su auxilio se ha podido ir más léjos, y abordar y resolver en parte un problema que parecia inaccesible á las investigaciones humanas: el estudio de la composicion química de los astros, del Sol y de las estrellas, soles tan prodigiosamente apartados de nosotros, y la de las nebulosas que los telescopios nos permiten ver sumergidas en los abismos del éter á distancias cuya profundidad apénas puede sondar la imaginacion.

Hé aquí enumerados en breves líneas los experimentos que han deparado un resultado tan magnífico:

Situemos la llama de un mechero de gas delante del anteojo del espectroscopio, y amortigüémosla hasta el punto de que quede reducida á una llama azulada casi imperceptible. En tal estado no da espectro: detrás del prisma reina completa oscuridad. Pero si introducimos en la llama una sal metálica, por ejemplo, un poco de sal marina, aparecerá al punto la raya amarilla del sodio, segun hemos visto ántes.

Si se da paso á un rayo de Sol al propio tiempo y en el mismo prisma, de modo que el espectro del sodio y el solar se sobrepongan, se notará una coincidencia perfecta en la posicion de la raya amarilla del sodio y de la doble raya oscura D de Frauenhofer.

Ahora, sustituyamos á la luz del Sol la conocida con el nombre de *luz de Drummond*—que se obtiene quemando un fragmento de cal en

una llama de gas atravesada por una corriente de oxígeno;—el espectro de esta luz, visto aislado, presenta notable esplendor y perfecta continuidad, y no contiene ninguna de las líneas oscuras del solar. Pero si se procede de modo que cubra exactamente el espectro del sodio, interponiendo la luz Drummond entre el prisma y la llama de dicho metal, desaparece en el acto la línea amarilla del sodio, siendo reemplazada por una línea oscura que ocupa precisamente la misma posicion que la raya brillante.

Kirchhoff ha designado este fenómeno con el nombre de *inversion del espectro de las llamas*, habiéndolo comprobado en un gran número de espectros metálicos.

«Si se hace llegar, dice, un rayo solar á través de una llama de litio, se ve aparecer en el espectro, en el sitio de la raya roja, otra oscura que compite en pureza con las rayas de Frauenhofer más características, y que desaparece cuando se retira la llama de litio. No se obtiene tan fácilmente la inversion de las rayas brillantes de los otros metales; sin embargo, M. Bunsen y yo hemos tenido la suerte de invertir las rayas más brillantes del potasio, estroncio, calcio y bario.»

¿Qué consecuencia debe deducirse de hecho tan singular? Que los vapores metálicos, dotados de la propiedad de emitir en abundancia ciertos rayos de colores con preferencia á los otros, absorben por el contrario estos mismos rayos emanados de un foco luminoso y que atraviesen el primer foco. Por ejemplo, la luz del sodio que emite rayos amarillos de refrangibilidad determinada, absorbe precisamente los rayos amarillos de igual refrangibilidad de la luz Drummond á su paso por ella, resultando de aquí esa raya negra que en el espectro continuo se sitúa en el puesto que ocupaba la raya brillante del sodio.

Si esta absorcion es un hecho general, debe deducirse de ella que las líneas negras, observadas en el espectro solar, indican la inversion de otras tantas rayas brillantes debidas á los vapores metálicos de su atmósfera. Esta atmósfera hace con respecto á nosotros las veces de un mechero oscuro de Bunsen, y la viva luz del cuerpo del Sol las de la luz Drummond en el mismo experimento.

Estudiando Bunsen y Kirchhoff bajo este punto de vista las rayas negras del espectro solar, han tenido ocasion de comprobar la coincidencia de gran número de ellas con las rayas brillantes de ciertos metales. Por ejemplo, las 70 líneas brillantes del hierro, que varian en color, anchura é intensidad, coinciden por todos estos conceptos y tan exactamente con las 70 rayas oscuras del Sol, que es imposible dudar que en la atmósfera solar haya hierro en estado de vapor metálico. Los mismos sabios han reconocido la presencia de diez y nueve cuerpos simples en el Sol: estos cuerpos son los siguientes: hidrógeno, cobre, zinc, cromo, níkel, magnesio, bario, calcio, sodio, potasio, aluminio, manganeso, cobalto, estroncio, cadmio, titano, cerio, uranio y plomo.

De la falta de las rayas características de otros metales, como oro, plata, platino, etc., en el espectro solar, creyeron poder deducir que en el Sol no los habia, al ménos en las capas exteriores que forman su atmósfera, habiendo hecho la misma observacion con respecto á los metaloides, excepto el hidrógeno, por ejemplo nitrógeno, oxígeno, carbono, azufre, etc.; pero esta deduccion era demasiado absoluta, segun resulta de los nuevos estudios hechos por Mitscherlich. Segun este físico, sucede que el inmediato efecto de la presencia de ciertas sustancias en una llama consiste en impedir que se produzcan los espectros de otras sustancias y en disipar sus rayas principales; así por ejemplo, cuando se impregna de cloruro de cobre y de amonio la llama del cloruro de estroncio, desaparece la raya azul de este último metal.

¿No es por ventura cosa maravillosa esa propiedad que tiene la luz de revelar con tan gran sensibilidad la composicion química de los cuerpos de que emana, y de conservar, al cabo de un curso de 37 millones de leguas, vestigios de la absorcion de tal ó cual rayo de color, indicio cierto de la accion de los cuerpos simples en suspension en una atmósfera que los astrónomos apénas sospechaban y cuya existencia ha quedado de tal suerte confirmada?

Sin embargo, entre las numerosas rayas que se observan en el espectro de la luz del Sol hay unas cuantas que no tienen por causa la absorcion de la atmósfera solar. M. Janssen ha probado que la atmósfera terrestre contribuye

en parte este fenómeno, y ha llamado *rayas telúricas* á las que dimanan de esta última causa. Ya en 1833 Brewster descubrió en el espectro del Sol líneas oscuras que modificaban el aspecto de ciertas regiones del mismo; estas líneas, visibles á la salida y á la puesta de dicho astro, es decir, cuando es mayor el espesor de las capas atmosféricas interpuestas, desaparecian á medida que el astro se elevaba sobre el horizonte. M. Janssen ha hecho muchos experimentos que han confirmado los de Brewster, y comprobado la presencia de las rayas telúricas en los espectros de otros astros, por ejemplo en el de Sirio, demostrando además que la absorcion electiva de nuestra atmósfera se debe sobre todo al vapor de agua que el aire contiene, de suerte que el conjunto de dichas rayas constituye el espectro del vapor de agua mismo.

En la figura 107 se ven algunas de las rayas en cuestion situadas cerca de la línea D del espectro. La porcion superior representa esta region observada cuando el Sol está en el meridiano: la inferior es la misma region vista cuando el astro se halla cerca del horizonte, á su orto y á su ocaso: en ella es de notar una multitud de rayas finas agregadas á las primeras: son las rayas telúricas de esta parte del espectro.

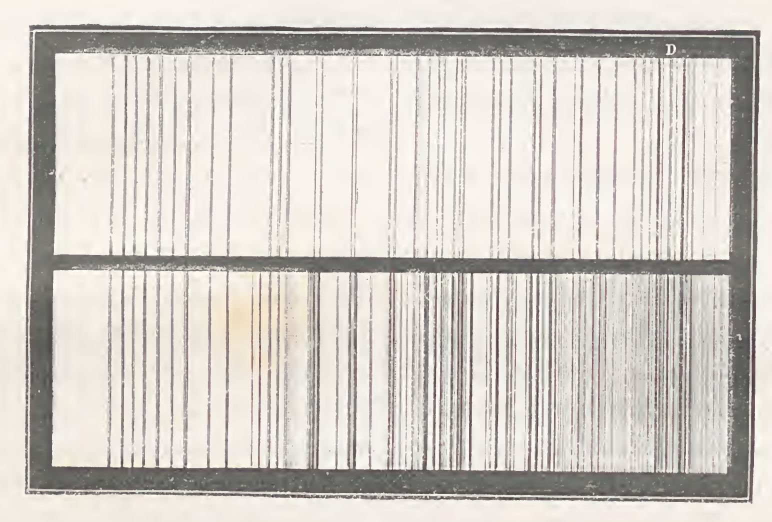



*Fig. 107.*—Líneas telúricas de la region D del espectro solar

El análisis espectral ha ido todavía más léjos en el estudio de la constitucion química del Sol: se ha consagrado á analizar la misma atmósfera solar, y ante todo las protuberancias luminosas que se notan en el contorno del astro durante el breve intervalo en que la Luna oculta su disco en los eclipses totales.

Varios observadores, entre los cuales citaremos dos astrónomos ingleses, el teniente Herschel y el mayor Tennant, y otros dos franceses, Rayet y Janssen, aplicaron el espectroscopio á esos curiosos apéndices del contorno del Sol, cuando ocurrió el eclipse total del 18 de agosto de 1868, y vieron aparecer en el espectro de las protuberancias observadas cierto número de líneas brillantes, dos de las cuales correspondian á las rayas C y F del espectro solar, demostrando así la existencia del hidrógeno. En aquella circunstancia ideó M. Janssen un método de observacion que permitia explorar el contorno del Sol áun cuando no hubiera eclipse total, y este método perfeccionado ha hecho posible en cualquiera ocasion el estudio de las protuberancias, el análisis de su luz y el exámen detallado de todas las circunstancias que intervienen en su orígen, formas, alturas y trasformaciones. El que desee conocer la descripcion detallada de estos fenómenos puede consultar los primeros capítulos de mi obra *El Cielo* que tratan de la constitucion del Sol: aquí me concretaré á resumir brevemente los principales resultados de esta inesperada aplicacion del análisis espectral.

Se ha reconocido que las protuberancias no son otra cosa sino expansiones accidentales de una capa de materia que cubre todo el Sol, y que está principalmente constituida por hidrógeno en estado de incandescencia. Hase dado á esta capa el nombre de cromo-esfera. La luz que emite es muchísimo ménos intensa que la de la foto-esfera que limita el contorno visible del

astro, siendo esta enorme diferencia de intensidad la que hacia imposible la observacion habitual de las protuberancias, á pesar de la gran altura de algunas de ellas. Como en los eclipses totales la luz solar está completamente interceptada por el disco oscuro de la Luna, las protuberancias eran visibles, si bien desaparecian tan luégo como la luz foto-esférica aparecia de nuevo. El empleo del espectroscopio, tan ingeniosamente aplicado por Janssen, allanó la dificultad; y en efecto, el prisma extiende la vivísima luz del Sol cual una prolongada cinta, cuyas diferentes partes son tanto ménos luminosas cuanto mayor es la dispersion; la luz de las protuberancias se reduce, por el contrario, á un corto número de rayas muy finas; la tenuidad producida por la dispersion es casi nula, y en las pocas y angostas regiones en que esta luz se concentra, el brillo de las rayas es comparable al de las partes correspondientes del espectro solar.

El hidrógeno es el elemento principal de la cromo-esfera, pero no el único. La exploracion espectroscópica de sus capas más bajas ha dado á conocer un número creciente de rayas brillantes que se han identificado con las de muchos cuerpos simples, metales ó metaloides. Como se podia prever, la mayoría de estos cuerpos se habia reconocido ya en el espectro solar; pero hay cierto número de ellos, como el oxígeno, el nitrógeno, el azufre, el bromo, es decir, precisamente los metaloides, cuya falta se habia notado ya en la foto-esfera solar y que parecian existir en la cromo-esfera.

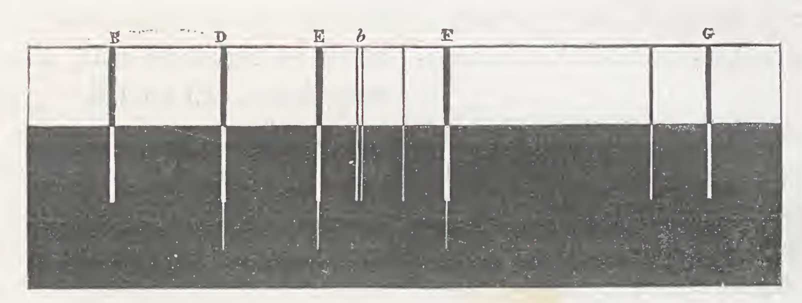
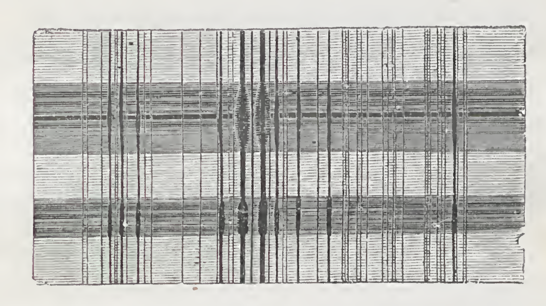


*Fig. 108.*—Líneas brillantes de las protuberancias solares, observadas por Rayet

Otra capa mucho más extensa que la cromo-esfera rodea al Sol á una altura que viene á ser igual al radio del astro; esta capa es la *corona*, especie de expansion luminosa cuyos límites exteriores son muy poco definidos y bastante irregulares, y que se ha observado varias veces durante los eclipses totales. Se ha podido efectuar el análisis espectral de la luz coronal durante la totalidad de algunos eclipses, habiendo quedado demostrado que la corona es un medio gaseoso muy enrarecido, formado en parte de gas hidrógeno y en parte tambien de otra sustancia todavía desconocida, y caracterizada por una raya verde especial que lleva el número 1474 en la escala espectroscópica de Kirchhoff. Pero la luz de la corona contiene asimismo rayos procedentes por reflexion de la foto-esfera y de las regiones más brillantes de la cromo-esfera.

Examinando las manchas del Sol con el espectroscopio se ha notado que las rayas oscuras parecen en ellas más anchas y confusas, fenómeno que puede verse en la figura 109, la cual representa una porcion del espectro solar visto á través de una mancha: las rayas foto-esféricas aparecen sumamente ensanchadas en la penumbra y en el núcleo, lo cual se explica atribuyéndolo á una absorcion bastante mayor en estos puntos procedente del espesor más considerable de las capas absorbentes, suponiendo cierto que las manchas sean cavidades.


*Fig. 109.*—Espectro de las manchas solares

Pasando ahora del estudio del Sol al de la luz de los demás astros, veremos que el análisis espectral ha enriquecido la ciencia con hechos nuevos del mayor interés.

Los planetas no brillan con luz propia; su esplendor es el de la luz solar reflejada en la superficie de cada uno de ellos. Podíase, pues,

prever que el análisis espectral de las luces planetarias daria espectros análogos al solar, y así lo han comprobado efectivamente los observadores. Con todo hay algunas diferencias que indican ciertas modificaciones sufridas por la luz solar, la cual no llega hasta nosotros sino despues de atravesar dos veces la envolvente atmosférica del planeta cuando esta envolvente existe. Por lo tanto, en el estudio espectroscópico de las luces planetarias puede haber preciosas indicaciones sobre la existencia de estas atmósferas y sobre la composicion química ó estado físico de las sustancias que las componen.

Resumamos el estado actual de los conocimientos sobre este punto.

Empecemos por nuestro satélite. La luz de la Luna ha sido analizada por Janssen en Roma, y por Huggins y Miller en Inglaterra; pero estos observadores han visto que su espectro era idéntico al solar, no habiendo reconocido en él ninguna faja ó raya nueva: la única diferencia consiste en la variacion de intensidad segun las regiones del disco examinadas. Nada ha indicado la presencia ó la accion absorbente de una atmósfera, y esto confirma la opinion largo tiempo acreditada de que la Luna carece de ella.

«Cuando se observa, dice Huggins, el espectro de una estrella poco ántes del momento ó en el momento mismo en que la oculta el borde oscuro de nuestro satélite, podria suponerse que se iban á percibir algunos fenómenos característicos del paso de la luz de la estrella á través de una atmósfera. Si existe una atmósfera lunar que, ya por las sustancias de que está formada ó bien por los vapores que tenga en disolucion, pueda ejercer una absorcion electiva en la luz de la estrella, deberia indicarse esta absorcion por la aparicion de nuevas rayas oscuras en los espectros, inmediatamente ántes de su ocultacion por la Luna. Si en torno de este astro hay una atmósfera libre de todo vapor y sin poder absorbente, pero de alguna densidad, en este caso el espectro de la estrella no quedaria extinguido en el mismo instante en toda su longitud: las rayas moradas y azules subsistirian aún despues de la desaparicion de los rayos rojos. He observado con el mayor cuidado la desaparicion del espectro de la estrella E de los Peces, en la ocultacion del 4 de enero de 1865, con objeto de estudiar este fenómeno, y no he podido descubrir el menor indicio de atmósfera lunar.»

«Si alrededor de la Luna, sigue diciendo Huggins, hubiera una materia finamente dividida, acuosa ó de otro género, las rayas rojas de la luz solar tendrian que debilitarse en menor grado que las rayas de mayor refrangibilidad.»

En virtud de las observaciones telescópicas de Mercurio, los astrónomos sospechaban que habia en torno de este planeta una atmósfera muy densa. El análisis espectral de su luz parece confirmar esta creencia. Y en efecto, véase lo que dice Vogel acerca de este asunto: «Las rayas principales del espectro de Mercurio coinciden absolutamente con las del espectro solar: resultando además de las observaciones que ciertas rayas que no aparecen en el espectro del Sol sino cuando este astro está muy cerca del horizonte (las rayas telúricas) y es muy grande la absorcion ocasionada por nuestra atmósfera, se encuentran *siempre* en el espectro de Mercurio. Así pues, debe deducirse de esto la existencia de una envolvente gaseosa alrededor de Mercurio, la cual ejerce en los rayos solares una accion absorbente igual á la de nuestra atmósfera, cuando llega á su máximum. Por lo regular, las partes ménos refrangibles del espectro de Mercurio presentan un brillo más vivo que las refrangibles; pero es imposible separar aquí el efecto de nuestra atmósfera del producido por la del planeta.»

El análisis espectral no ha indicado nada de cierto á W. Huggins acerca de la existencia de una atmósfera en torno de Vénus, pero el P. Secchi parece haber sido más afortunado, pues en el espectro de su luz ha visto rayas análogas á las del vapor de agua de la atmósfera terrestre, de lo cual no tan sólo ha deducido naturalmente la realidad de una atmósfera, sino tambien la analogía de composicion que ofrece con la nuestra. Sábese que las observaciones astronómicas demuestran que Vénus está rodeada efectivamente de una atmósfera muy densa, pero como las alteraciones introducidas en el espectro solar son por el contrario muy pocas, Vogel ha creido poder deducir de aquí «que los rayos solares que nos envia Vé-

nus se reflejan en su mayor parte en la superficie de la capa de nubes que la rodea, sin penetrar casi en su interior.»

Segun hemos dicho ya, Marte es un planeta que tiene grandes analogías con la Tierra, bajo el punto de vista de su constitucion física. Se han observado en su superficie, además de las manchas permanentes, otras manchas variables y movibles, que tienen toda la apariencia de masas vaporosas flotantes en la atmósfera del planeta. El análisis espectral confirma estas probabilidades de la existencia de una atmósfera formada de gases y vapores, y en efecto, el P. Secchi ha visto en el espectro de la luz de Marte líneas semejantes á las del vapor de agua de nuestra atmósfera. W. Huggins ha observado una raya cuya posicion no coincidia con ninguna de las del espectro solar; presumiendo por esta causa que se debe á la absorcion del planeta y probablemente á la atmósfera que lo rodea: otras líneas le han parecido idénticas á las que se ven en la luz solar cuando ha atravesado las capas más bajas de nuestra atmósfera ó *stratus* poco elevados; y que provienen sin duda de la absorcion por los gases ó los vapores que constituyen estas capas. Así pues, Marte tiene seguramente una atmósfera vaporosa. Largo tiempo hacia que los astrónomos habian observado que los bordes del disco de Marte son más luminosos que sus partes centrales, lo cual inducia á presumir la existencia de una atmósfera que ofuscara con su brillo las manchas oscuras, en el momento en que á causa de la rotacion se encuentran en los bordes.

Vogel ha confirmado estos resultados en sus *Estudios de espectroscopia planetaria.* «En el espectro de Marte, dice, se advierte un considerable número de rayas del espectro solar. En las porciones ménos refrangibles del espectro, aparecen algunas fajas que no pertenecen al espectro solar, pero que coinciden con las del espectro de absorcion de nuestra atmósfera. Puede pues suponerse con certeza que Marte tiene una atmósfera que por su composicion no difiere esencialmente de la nuestra, y que debe ser rica sobre todo en vapor de agua. El color rojo de Marte parece resultar de una absorcion que se ejerce generalmente en los rayos azules y morados en su conjunto; al ménos, no ha sido posible discernir fajas de absorcion determinadas en esta parte del espectro.»

Desde Marte, crucemos todo el intervalo que lo separa de Júpiter, intervalo ocupado, como nadie ignora, por los innumerables planetas telescópicos, y lleguemos al globo colosal tan fácil de conocer por su aplanamiento y por las bandas alternativamente oscuras y luminosas que surcan su superficie. El estudio de estas apariencias y de sus variaciones de forma, posicion y color ha inducido á suponer que las bandas luminosas son zonas de nubes que reflejan fuertemente la luz solar, al paso que las bandas oscuras corresponden á los espacios despejados á través de los cuales se ve el suelo del planeta. Las curiosas variaciones notadas en estos accidentes parecen pues debidas á cambios atmosféricos.

El análisis espectral de la luz de Júpiter ha proporcionado algunos datos sobre la naturaleza de su envolvente gaseosa más positivos que los que da la observacion telescópica. Hé aquí lo que han notado Huggins y Miller, observadores avezados á esta clase de investigaciones. «En el espectro de Júpiter, dicen, se ven rayas que indican que alrededor de este planeta hay una atmósfera absorbente. Una faja oscura corresponde á varias rayas atmosféricas terrestres y probablemente indica la presencia de vapores análogos á los de la atmósfera de la Tierra. Hay otra faja que no corresponde con ninguna de las rayas de absorcion de nuestra atmósfera, y demuestra la presencia de algun gas ó vapor que no existen en la atmósfera terrestre. Segun Vogel, convie-




*Fig. 110.*—Júpiter y sus bandas

ne averiguar si esta faja oscura (en el rojo, longitud de onda 617.9) resulta de algun cuerpo peculiar á la atmósfera de Júpiter, ó si procede de la mezcla de los gases de que está formada con arreglo á proporciones distintas de las del aire. «Seria posible, dice, que la composicion de las dos atmósferas fuese la misma, difiriendo únicamente su accion sobre los rayos solares á consecuencia de las circunstancias de temperatura y de presion, muy diferentes en la superficie de Júpiter de lo que son en nuestro planeta.»

El mismo astrónomo añade: «El espectro de las bandas oscuras del disco de Júpiter se caracteriza sobre todo por una absorcion uniforme, muy marcada, que sufren los rayos azules y morados. En esos puntos no se ven aparecer nuevas bandas de absorcion, sino que las rayas son más marcadas y anchas que en cualquiera otra parte; lo que prueba que las porciones oscuras de la superficie de Júpiter son más profundas que las inmediatas. En dichos puntos de la atmósfera del planeta, la luz solar penetra más profundamente y experimenta mayor alteracion. Esta observacion viene en apoyo de la opinion generalmente admitida de que las bandas brillantes son cúmulos opacos de nubes.»

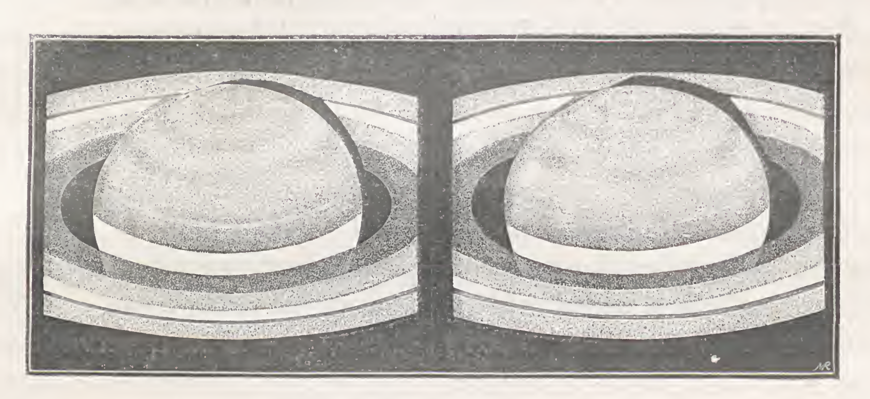


*Fig. 111.*—Las bandas del globo de Saturno, segun Bond

Saturno es, como Júpiter, un poco aplanado en sus polos de rotacion, y su disco tiene tambien bandas de aspecto agrisado paralelas al ecuador. Por analogía se las ha considerado como si estuviesen formadas de zonas de nubes que la rapidez del movimiento de rotacion acumula sin cesar á una y otra parte de las regiones ecuatoriales del planeta, en virtud de un fenómeno semejante al de los alisios terrestres, pero mucho más regular y permanente. Sólo que Saturno se halla á tan gran distancia de la Tierra que no es posible distinguir ningun detalle en su disco, y que hasta ahora no pasaba de ser una hipótesis la existencia de una atmósfera vaporosa alrededor del planeta. Por fortuna, el análisis espectral ha permitido completar acerca de este asunto los elementos proporcionados por la investigacion telescópica. Hé aquí lo que hasta hoy nos ha dado á conocer:

Segun W. Huggins, el espectro de Saturno es en extremo débil, pero se observan en él algunas rayas semejantes á las que caracterizan el de Júpiter; estas líneas se ven con menor distincion y claridad en la luz de las asas de los anillos, demostrándonos que el poder absorbente de la atmósfera alrededor de estos es más débil que el de la que circunda el globo del planeta. Janssen ha descubierto últimamente que muchas de las rayas atmosféricas son producidas por el vapor de agua. Es verosímil que este vapor acuoso exista en las atmósferas de Júpiter y Saturno. El P. Secchi ha notado semejante analogía entre los espectros luminosos de los dos planetas, y observado además en el de Saturno rayas que no coinciden con ninguna de las líneas telúricas producidas por la absorcion de nuestra atmósfera; así pues la de este último planeta contiene sin duda gases que no existen en la nuestra.

M. Vogel caracteriza por su parte el espectro de Saturno en los siguientes términos: «Se ha podido reconocer en él las rayas más marcadas del espectro solar; algunas fajas, sobre todo en el rojo y en el anaranjado, no tienen sus equivalentes en dicho espectro; pero coinciden con grupos de rayas del de nuestra at-

mósfera, excepcion hecha de una faja muy intensa (longitud de onda media 618,2). Los rayos azules y morados sufren una absorcion uniforme en su paso á través de la atmósfera de Saturno, la cual es mucho más marcada en la zona ecuatorial oscura. El espectro de Saturno presenta pues la mayor analogía con el de Júpiter. No sucede lo propio con el de su anillo, pues en él no se advierte la faja característica en el rojo, ó por lo ménos apénas si se percibe un tenue indicio. Podria deducirse de esto que el anillo no tiene atmósfera, ó que á lo sumo está rodeado de una capa gaseosa de densidad y espesor sumamente débiles.»

El espectro de Urano ha sido estudiado por Secchi, Huggins y Vogel: su escaso brillo no permite distinguir en él las rayas de Frauenhofer, pero se han notado muchas líneas oscuras, una de las cuales parece coincidir con la F del hidrógeno. Segun Vogel, «es indudable que las bandas observadas en el espectro de Urano resultan de la absorcion de los rayos solares en una atmósfera que rodea á dicho planeta. Dado el estado actual de la ciencia, no es posible determinar cuáles son los cuerpos que producen esta absorcion. Haremos solamente advertir que una de las bandas del espectro de Urano coincide exactamente con otra de Júpiter y de Saturno (que hemos indicado más arriba).»

Por último, segun el mismo observador, el espectro de Neptuno, en el que tampoco se pueden distinguir las rayas de Frauenhofer, y al que caracterizan unas cuantas bandas anchas y oscuras, tiene gran analogía con el de Urano.

Vése por los resultados de estas investigaciones tan delicadas como difíciles, que si la luz de los planetas analizada con el espectroscopio conserva los caractéres principales que denotan su orígen solar, debe sin embargo haber experimentado modificaciones importantes. Varias regiones del espectro, ó si se quiere, ciertos rayos de la luz primitiva, han sido absorbidos por su doble paso á través de los medios gaseosos que constituyen las atmósferas planetarias. En muchos de ellos se nota la influencia del vapor de agua, pero tambien parece probable que otros elementos dan orígen á absorciones especiales y que por lo tanto no todas las atmósferas se componen de las mismas sustancias.

Sin salir del sistema solar, vamos á interrogar tambien al análisis espectral con respecto á la constitucion de ciertos cuerpos que difieren seguramente de los planetas por su aspecto, forma y orígen, tanto por lo ménos como por sus demás caractéres astronómicos. Nos referimos á los cometas, á las estrellas fugaces y á los bólidos.

Estudiando las luces cometarias con los instrumentos de óptica que más adelante describiremos, se ha llegado á deducir que, si bien los cometas reflejan una escasa parte de la luz que el Sol envia á su superficie, son cuerpos que tambien la tienen propia. La opinion más general es la de que sus núcleos son incandescentes, y así lo vamos á ver confirmado por el análisis espectral.

Ante todo, hay una circunstancia comun á todos los cometas cuya luz se ha analizado, y es que su espectro consiste principalmente en cierto número de bandas luminosas brillantes, separadas por anchos espacios oscuros. El espectro continuo, bastante débil por cierto, en el cual se proyectaban estas bandas, no existia ó por lo ménos no era visible sino para algunas de ellas; los cometas cuyo núcleo era muy débil, como el del cometa de Encke, ó poco luminoso (cometa 1873 IV), no han dado espectro continuo. Parece pues averiguado que las bandas luminosas son producidas por la luz de las atmósferas ó de las cabelleras cometarias, y por consiguiente, los cometas de núcleo, cuya luz se ha podido analizar con el prisma, deben estar constituidos del modo siguiente:

En el centro de la nebulosidad hay un núcleo que da un espectro continuo. ¿Indica esto necesariamente una materia líquida ó sólida incandescente? Podria afirmarse así si pudiera considerarse como entera la continuidad de este espectro; pero su tenuidad es tal, que es difícil decir si la luz con que brilla es una luz propia debida á la incandescencia de la materia que compone el núcleo, ó si es la luz reflejada del Sol. Quizás participe de ambos orígenes, sobre todo cuando el cometa, al acercarse al Sol, adquiere una temperatura creciente; en todo caso, las observaciones de polarizacion por reflexion prueban que cuando ménos una parte de esta luz es reflejo de la del Sol.

Por lo que respecta á la luz de las atmósfe-

ras y de las colas, el espectro de bandas brillantes denota que la materia que las forma se halla á la vez en estado gaseoso é incandescente. Como, por otra parte, los fenómenos de los penachos emanados del núcieo prueban que las envolventes atmosféricas se forman á expensas de éste, parece difícil admitir la incandescencia para la atmósfera cometaria y para las colas, si el núcleo mismo de que continuamente se forman no participa de este estado de incandescencia. No es, pues, dudoso que los núcleos comentarios emitan, á lo ménos cuando se hallan próximos al perihelio, además de la luz reflejada del Sol, otra directa emanada de su propia sustancia.

Considerados desde el punto de vista químico los cometas que se han analizado, bien es verdad que en corto número, tienen una constitucion

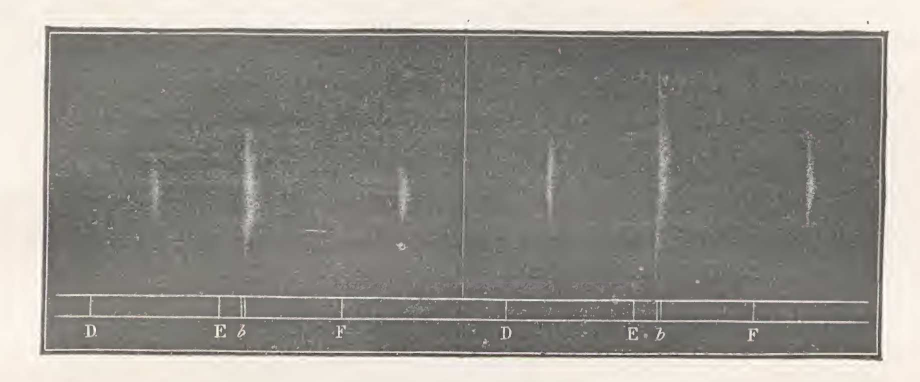



*Fig. 112.*—Espectro del cometa IV de 1873.—1.° El 26 de agosto.—2.° El 29 de agosto.

muy poco compleja. Son, ó carbono simple, ó un compuesto de carbono, hidrógeno carbonado segun las comparaciones hechas por Huggins, óxido de carbono ó ácido carbónico, segun las investigaciones del P. Secchi. Este sabio tenia, pues, razon en decir: «Es notable que todos los cometas observados hasta aquí tengan las bandas del carbono.»

Entre los cometas y las estrellas fugaces media cierto vínculo de orígen, segun parece hoy demostrado. Estos últimos corpúsculos scn restos de cometas dislocados; los enjambres ó apariciones periódicas de estrellas fugaces no son otra cosa sino fragmentos de cometas que al atravesar el sistema solar han sufrido las perturbaciones ocasionadas por las masas de los planetas y se han fraccionado. Si estas nuevas apreciaciones concuerdan con la realidad, las estrellas fugaces deben tener la misma constitucion física que los cometas.

Pero como las estrellas fugaces no aparecen sino en las regiones más elevadas de la atmósfera, y se extinguen y probablemente se evaporan mucho ántes de llegar al suelo, sólo un método, el análisis espectral podria ilustrarnos acerca de su estado físico y químico, á lo ménos en el momento de su combustion. Estudiando A. Herschel de este modo la luz de las estrellas fugaces de las noches del 9 y 10 de agosto de 1866, vió que los astros y algunos núcleos de estrellas se componian de una sustancia gaseosa en ignicion, que contenia especialmente vapor de sodio. No siendo probable que en la atmósfera hubiera sodio á semejante altura, A. Herschel dedujo que este cuerpo simple pertenecia á las estrellas fugaces analizadas. Otros espectros han indicado que dichos meteoros estaban constituidos por aglomeraciones de partículas sólidas incandescentes.

En noviembre de 1868, el P. Secchi analizó la luz de una estrella muy viva, cuyo rastro subsistió visible por espacio de un cuarto de hora; su espectro, formado de rayas y bandas brillantes, rojas, amarillas, verdes, y azules, indicaba la presencia de un gas luminoso. Konkoly estudió en el espectroscopio, en julio y agosto de 1872, los rastros de tres meteoros; sus espectros contenian todas las rayas del sodio, y uno de ellos tenia además una línea del magnesio. Un brillante meteoro aparecido el 13 de octubre de 1873 y analizado por el mismo observador, tenia, además de las rayas del magnesio y del sodio, cuatro líneas comunes con el espectro de un carburo de hidrógeno *(coal-gas)*. Finalmente, el Sr. Arcimis observó en 1874 en Cádiz 50 estrellas del grupo de las

Perseidas; 27 de ellas tenian un espectro continuo en el que por lo general faltaba el violeta; casi todas tenian, no obstante, la raya amarilla del sodio.

Comparando estos resultados con los dados por el análisis de los espectros de la luz de los cometas, se ve que la constitucion física de estos últimos cuerpos no es precisamente idéntica á la de las estrellas fugaces; verdad es que se ha reconocido el carbono en uno de los meteoros, pero los demás contienen sodio, cuya existencia no han indicado los espectros cometarios. La incandescencia gaseosa es la que caracteriza la luz de los cometas y de las estrellas fugaces; sin embargo, las segundas no parece que están dotadas de dicha incandescencia hasta que han penetrado en nuestra atmósfera, y en contra de la opinion del entendido Alejandro Herschel, nos inclinamos á creer que en ella es donde se encuentra el sodio reconocido por el análisis espectroscópico.

Terminaremos lo que teníamos que exponer acerca del análisis espectral aplicado á la astronomía de los cuerpos del mundo solar, consignando algunas observaciones recientes sobre la luz zodiacal. El sabio americano M. Wright ha deducido de sus observaciones hechas en 1874 las conclusiones siguientes: La luz zodiacal es la del Sol reflejada por una materia sólida. Y en efecto, vió que esta luz daba «un espectro continuo que no diferia notablemente (excepcion hecha de la intensidad) del espectro solar, desprovisto en todo caso de toda línea ó banda brillante análoga á la de la aurora boreal.» Smyth primero y Liais despues habian obtenido ya el resultado importante de la continuidad del espectro de la luz zodiacal, si bien el segundo creia que pudiera tener algunas débiles líneas negras. Pero debemos decir que otras observaciones contradicen completamente las que acabamos de mencionar. Habiendo analizado Respighi, en enero y febrero de 1872, la luz zodiacal con un espectroscopio de vision directa, «vió perfectamente marcada la conocida raya de Angstrom en el verde», raya que observó por la misma época en el espectro de una aurora boreal. «Este hecho, dice Respighi, que confirma una observacion análoga hecha por Angstrom en marzo de 1867, me parece bastante importante, pues vendria á demostrar la identidad de la luz de la aurora boreal con la zodiacal, y por consiguiente, la probable identidad de su orígen.»

Por último, Tacchini, refiriéndose á las observaciones de Wright, recuerda que en abril de 1872 analizó con P. Smyth la luz zodiacal, viendo que su espectro era continuo, lo cual no obstante tenia una zona claramente iluminada, que se disipaba por los lados, cosa que jamás sucede con una luz solar de escasa fuerza. El sabio astrónomo de Palermo cree poder deducir de esto «que la luz zodiacal no es tan sólo la solar reflejada por corpúsculos meteóricos; pues además de las partículas sólidas capaces de dar por reflexion el espectro y la polarizacion observados por Wright, la masa lenticular puede contener alguna sustancia mantenida por el calor solar en tal estado físico que resulte de él un espectro particular análogo al de los cometas ó al de la atmósfera de la corona.»

## II

### EL ANÁLISIS ESPECTRAL APLICADO AL ESTUDIO DE LAS ESTRELLAS Y DE LAS NEBULOSAS

Si la ley universal de la gravitacion es un testimonio de la unidad del principio que regula los movimientos de la materia, aglomerada en forma de cuerpos celestes, lo mismo en los límites de nuestro mundo solar que en las regiones exteriores del mundo sidéreo, en cambio no nos enseña nada referente á la constitucion íntima de dichos cuerpos, ni á la naturaleza física y química de que están formados.

Ha sido menester el descubrimiento de las propiedades de la luz, expuestas en los capítulos anteriores, así como la invencion de un método tan delicado y exacto como el análisis espectral, para llegar á penetrar el secreto de dicha composicion. Acabamos de ver que los resultados de la aplicacion de este método á la astronomía solar y planetaria son ya bastante numerosos y positivos para que se pueda considerar como sumamente probable la unidad de composicion química del Sol y de los planetas. En el seno de esa inmensa masa incandescente, del foco del que se han desprendido en el orígen de las cosas, como otros tantos hijos de un mismo padre, los embriones de esos globos hoy

extinguidos, el análisis espectral ha reconocido la existencia de los mismos cuerpos simples, metales y metaloides, cuyas variadas combinaciones forman la masa de nuestra Tierra lo propio que su envolvente gaseosa; químicamente, el Sol tiene la misma composicion que cualquiera de los ocho planetas principales. Tal vez contenga algunos elementos que desconocemos; quizás tambien carezca de varios de los elementos terrestres. La temperatura excesiva á que los cuerpos están sometidos en él y que es tal que ninguna de las combinaciones conocidas en la superficie de la Tierra puede subsistir en la foto-esfera y en la cromo-esfera del Sol, no permite que se trate con insistencia de diferencias que quizás no sean efectivas, ni la conclusion general de la identidad de los materiales del Sol, de la Tierra y por analogía de los demás planetas parece quedar invalidada por estas excepciones de la regla.

Vamos ahora á ocuparnos de la misma cuestion, dejando el mundo solar y planetario para estudiar desde el mismo punto de vista el Universo sidéreo, es decir, las estrellas y las nebulosas. Antes que se hubiera aplicado el espectroscopio á las luces estelares, los astrónomos habian establecido como un hecho fuera de toda discusion el que las estrellas no son cuerpos que brillan con luz prestada, reflejada, sino astros luminosos por sí mismos como el Sol, focos primitivos de luz, probablemente masas incandescentes. Así va á confirmarlo el análisis espectral, añadiendo preciosos datos sobre la constitucion física y química de las estrellas.

Hemos visto que cuando Frauenhofer hubo descubierto las innumerables rayas oscuras de que está surcado el espectro de la luz solar, concibió ántes que nadie la idea de estudiar del propio modo los espectros de la luz de las estrellas. En las de Sirio, Castor, Pólux, la Cabra, Betelgeuze y Procion vió cierto número de rayas situadas de distinto modo con relacion á las rayas y colores del espectro solar, pero en las cuatro últimas estrellas pudo reconocer la identidad de posicion de una ó dos rayas, y en especial de la D colocada, como es sabido, en medio del amarillo del espectro solar. Frauenhofer publicó estos resultados en 1823. Treinta y siete años despues, ó sea en 1860, el astrónomo Donati hizo extensivo el mismo estudio á mayor número de estrellas, eligiendo siempre las de primera magnitud á causa de su mayor intensidad luminosa. Para concentrar en la ranura del espectroscopio toda la cantidad posible de luz emanada de la estrella observada, se valió de un anteojo de grandes dimensiones (41 centímetros de diámetro por $1^{m},58$ de distancia focal). Así pudo fijar, relativamente á las líneas del espectro solar, las posiciones exactas de las rayas de 13 estrellas, á saber: Sirio, Wega y Procion, tres rayas cada una; Régulo, dos; Fomalhaut, una; Castor, dos; Atair, otras dos; la Cabra, tres; Arcturo, dos; Pólux, dos; Aldebaran, dos; Betelgeuze, tres, y Antares, dos.

Todo cuanto podia deducirse de estos primeros resultados era que las luces de las estrellas estudiadas tenian cierta analogía entre sí y con la luz del Sol; que eran focos luminosos del mismo órden. Pero estas consecuencias adquirieron de pronto extraordinaria importancia, cuando Kirchhoff y Bunsen descubrieron el método del análisis espectral, y lo hubieron aplicado á la constitucion física y química del Sol. Comparando entónces las posiciones de las rayas de los espectros estelares con las rayas brillantes de los espectros de los gases y de los metales, se pudo hacer extensivas á las estrellas las deducciones ya obtenidas con respecto al Sol y conocer hasta cierto punto la constitucion física y química de cuerpos celestes cuya luz invierte años enteros en llegar hasta nosotros. Huggins y Miller en Inglaterra, Secchi en Roma, Janssen, Wolf y Rayet en Paris, Zollner en Alemania, son los nombres de los sabios á quienes somos deudores de los descubrimientos más interesantes, de los cuales vamos á hacer una rápida enumeracion.

*Aldebaran.*—Segun Huggins y Miller, la luz roja pálida de Aldebaran, analizada con el espectroscopio, presenta muchas líneas marcadas, particularmente en el anaranjado, en el verde y en el azul. Las posiciones medidas de 70 de dichas rayas han demostrado su coincidencia con las rayas brillantes de nueve elementos terrestres, á saber: sodio, magnesio, hidrógeno, calcio, hierro, bismuto, teluro, antimonio y mercurio. Las líneas del nitrógeno, cobalto,

estaño, plomo, cadmio, bario y litio, no han presentado ninguna coincidencia con las de la estrella.

*Betelgeuze* (*alfa* Orion), estrella cuya luz de color anaranjado tiene un espectro sumamente complejo y notable: en el rojo, verde y azul se ven fuertes grupos de líneas; además hay siete bandas oscuras que parecen formadas de finísimas líneas repartidas entre varias regiones del espectro, entre el rojo y el azul. En este espectro como en el de Aldebaran, se encuentran las rayas ántes citadas del sodio, magnesio, calcio, hierro y bismuto: pero ofrece la circunstancia característica de que faltan las rayas del hidrógeno.

*Beta Pegaso.*—El espectro de esta estrella tiene mucha analogía con el de *alfa* Orion: la misma disposicion en los grupos de líneas y bandas oscuras, y tambien la misma falta de hidrógeno. Se ha notado la presencia del sodio, del magnesio y probablemente del bario. El Sol y la mayor parte de las estrellas analizadas tienen en sus espectros las rayas C y F del hidrógeno; por consiguiente merece consignarse la falta de estas rayas y áun de la sustancia misma en las atmósferas de *alfa* Orion y de *beta* Pegaso.

*Sirio* (*alfa* del Can mayor). El espectro de esta brillante estrella es muy intenso; pero la escasa altura á que se halla el astro en nuestros climas dificulta la observacion de las rayas más finas. La doble línea D del sodio, las tres rayas *b* del magnesio, C y F del hidrógeno, coinciden con las principales líneas del espectro de Sirio, que al parecer tambien contiene hierro.

*Wega* (*alfa* Lira) tiene un espectro parecido al de Sirio, así como los mismos elementos de sodio, magnesio é hidrógeno.

*La Cabra.*—El espectro de esta estrella blanca es enteramente análogo al del Sol. Sus rayas son muy numerosas; y entre las que Huggins y Miller han medido está la doble línea D del sodio.

El espectro de *Polux*, rico en rayas, revela la existencia del sodio, del magnesio y probablemente del hierro.

Finalmente, tambien se ve la doble raya del sodio en el espectro de *Arcturo*, que tiene cierta semejanza con el solar.

El P. Secchi, que ha estudiado los espectros de más de trescientas estrellas de varias magnitudes, las agrupa en tres ó más bien en cuatro clases principales:

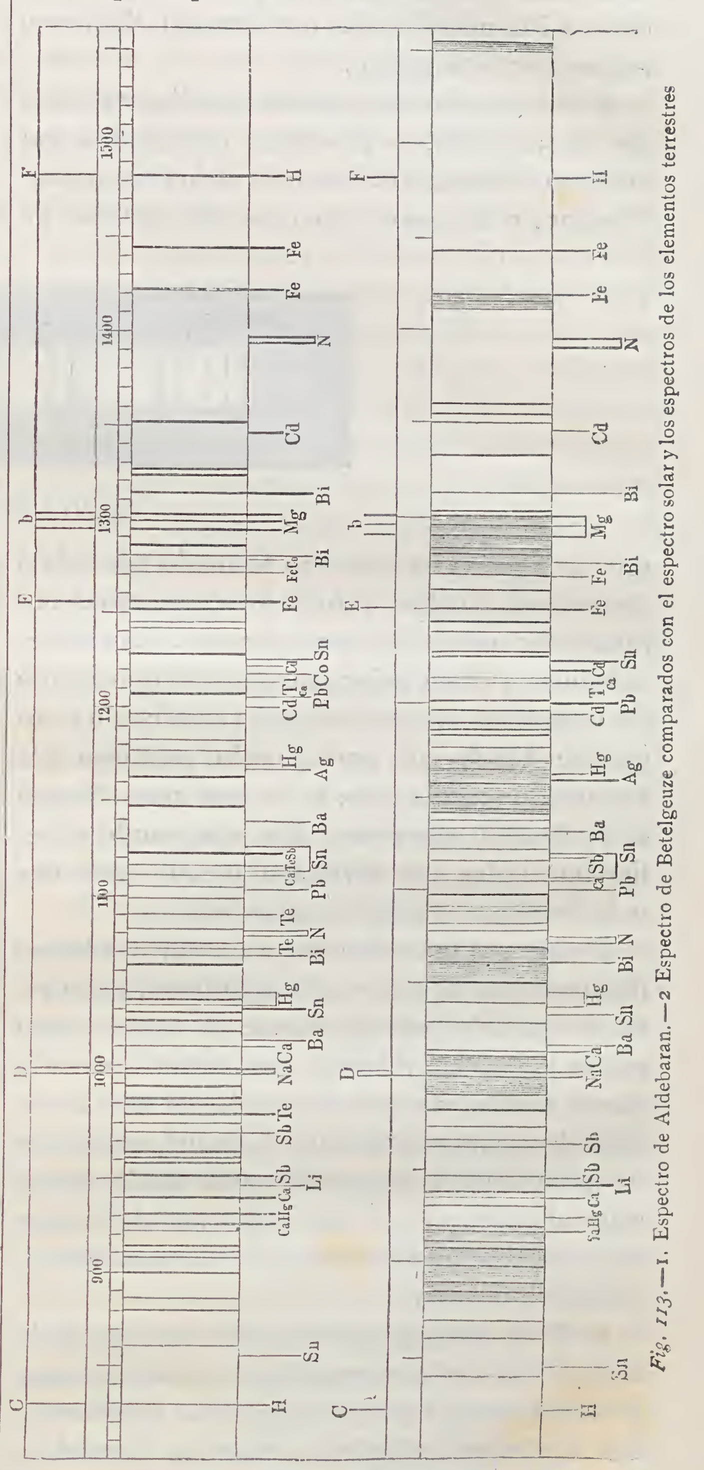


*Fig. 113.*—1. Espectro de Aldebaran.—2 Espectro de Betelgeuze comparados con el espectro solar y los espectros de los elementos terrestres

La primera clase comprende las estrellas blancas ó mejor dicho azuladas, cuyo tipo es Sirio; y á ella pertenecen Wega, Atair, Régulo, Rigel, las estrellas de la Osa mayor excepto *alfa;* las de Ofiuco, etc. El espectro de su luz está atravesado por cuatro gruesas rayas oscuras, situadas una en el rojo, la segunda en el azul tocando con el verde (raya F del espectro solar), la tercera en el morado (próxima á H); la cuarta,

en el extremo morado, es visible en el espectro de las estrellas más brillantes. Estas son las rayas más intensas del hidrógeno. Segun Secchi, casi la mitad de las estrellas del cielo corresponde á este grupo.

A la segunda clase pertenecen las estrellas de luz amarilla, y sus tipos principales son Arcturo, Pólux, la Cabra, *alfa* de la Osa mayor, Procion, y la mayor parte de las estrellas de segunda magnitud. Sus espectros, como el solar, están surcados de rayas finas y claras. Treinta rayas de Arcturo, escogidas entre las principales, coinciden con otras tantas solares. A esta clase corresponde la tercera parte de las estrellas del cielo.

Las estrellas rojas, como Betelgeuze, Antares, Algol, *alfa* de Hércules, *beta* del Pegaso, etc., componen la tercera clase, y tienen por lo regular un espectro formado por seis ó siete zonas anchas y brillantes, separadas por intervalos nebulosos, semi-oscuros. Las estrellas de esta clase, ménos numerosas que las de las otras dos, se confunden á veces con la segunda; Aldebaran, por ejemplo, participa á la vez de la segunda y de la tercera clase. Segun el P. Secchi, este tercer tipo comprende estrellas que todas son variables, y cuyo color tira más ó ménos á rojo ó anaranjado.

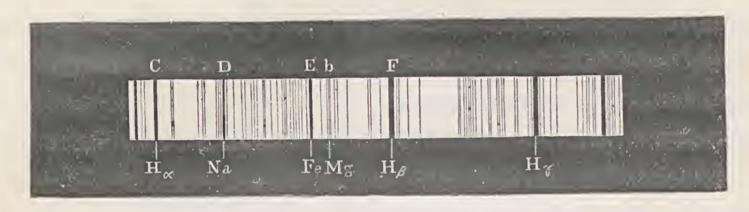



*Fig. 114.*—Espectro de Sirio

Constituye la cuarta clase un corto número de estrellitas de color rojo-sanguíneo, cuyo espectro no se diferencia del de la tercera sino por la menor cantidad de zonas claras y por la particularidad de que «la luz de las zonas empieza bruscamente hácia el lado del morado y va debilitándose insensiblemente hácia el del rojo, al paso que, en los espectros del tercer tipo, se presentan las mismas circunstancias en sentido inverso.»

La falta de hidrógeno en las estrellas de la tercera clase y la composicion química de unas y otras han sugerido á Huggins las observaciones siguientes: «Apénas me atrevo á emitir la idea de que los planetas que quizás circulen en torno de esos soles se parezcan probablemente á ellos, y de que tampoco posean un elemento de tanta importancia como el oxígeno. ¿Para qué formas de la vida pueden ser á propósito semejantes planetas? ¡Mundos sin agua! Necesitaríase la poderosa imaginacion de Dante para llegar á poblar tales planetas de séres vivientes. Pero prescindiendo de estas excepciones, merece notarse que los elementos terrestres más profusamente difundidos en el innumerable ejército de las estrellas son precisamente los necesarios para la vida, tal cual existe en la Tierra: el hidrógeno, el sodio, el magnesio y el hierro. Los tres primeros representan además el Océano, que es una parte esencial de todo mundo constituido tal como lo está la Tierra.»

La explicacion de los variados colores que caracterizan á las luces estelares, debe depender, segun Huggins, de la constitucion de su espectro. La luz, en el momento de su emision, seria blanca respecto de todas las estrellas; mas ántes de difundirse por el espacio, debe atravesar las atmósferas variadísimas de cada uno de estos soles. Este trayecto es el que produce la absorcion de tales ó cuales rayos, segun la naturaleza química de los vapores de las atmósferas solares, dando orígen á las rayas oscuras de cada espectro. Como estas rayas son más ó ménos oscuras y numerosas en las diversas regiones del espectro, resulta para el color de estas regiones una disminucion de intensidad que permite el predominio de los otros colores, ménos absorbidos. Las estrellas blancas deben ser aquellas cuyas rayas están diseminadas casi por igual en toda la longitud del espectro, por ejemplo, Sirio. Las rojas ó anaranjadas son las que tienen muchas rayas en el verde y en el azul: tales son *alfa* de Orion y *beta* del Pegaso.

Merced á un estudio comparativo de los espectros de las componentes de estrellas dobles, ha podido Huggins averiguar que el color azul

de la estrella menor, ó sea de la estrella satélite, es real y no producido por un efecto de contraste. Dicho astrónomo toma por ejemplo las componentes de la estrella doble *alfa* de Hércules. El espectro de la principal es notable por ciertos grupos intensos de rayas oscuras en el verde, en el azul y en el morado; en el amarillo, anaranjado y rojo sólo hay algunas muy tenues; de suerte que la disposicion de las bandas de absorcion concuerda con el color de esta estrella en que predomina el anaranjado. La luz del satélite es, por el contrario, azul-verdosa: su espectro está surcado de muchos grupos de líneas en el rojo y en el anaranjado, al paso que la region más refrangible adquiere mayor brillo á causa de la falta de rayas fuertes. En virtud de un análisis semejante, efectuado en las componentes de *beta* del Cisne, la una anaranjada y la otra azul, Huggins ha hecho las mismas deducciones.

El análisis espectral de la luz de las estrellas variables ó efímeras no da resultados ménos interesantes que el que tiene por objeto las estrellas simples ó dobles de luz constante. Hemos visto más arriba que, segun Secchi, las estrellas cuyo espectro pertenece al tercer tipo son por lo regular variables. Pero importaba comparar el estado de sus luces con las diversas fases de sus períodos. Consideremos con este astrónomo dos de las más célebres, Algol de período corto y regular, y *omicron* ó Mira de la Ballena, estrella variable de períodos largos.

«Algol, examinada muchas veces en la época de su mínimum de brillo, ha presentado siempre (como en su máximum) el mismo tipo que *alfa* de la Lira.» La deduccion que debe sacarse de esta constancia en el espectro de la estrella es, segun Secchi, que la variacion no dimana de un cambio real en la constitucion de la misma, porque el espectro variaria si la temperatura cambiase. El astrónomo romano la atribuye á los eclipses de un cuerpo opaco que hiciera su revolucion alrededor de la estrella en 2 dias 21 horas. «Esta idea, ya emitida anteriormente, dice Delaunay, concuerda muy bien con la regularidad del fenómeno y con la escasa duracion de la fase de disminucion (algo ménos de 7 horas) relativamente á la duracion total de un período.»

No sucede lo propio con Mira. Su espectro es del tercer tipo, de canales cilíndricas perfectamente marcadas, con las mismas rayas negras que en el de la estrella tipo *alfa* de Hércules. —«Pero á medida, dice el P. Secchi, que la estrella adquiere brillo, las rayas negras del amarillo y las primeras del verde parece disminuir de pureza y volverse ménos negras, caso interesante por cuanto indicaria un foco de variabilidad diferente del de Algol.» El mismo astrónomo indica como hecho notable el de que las estrellas variables de período regular (como *alfa* de Orion, *alfa* de Hércules, Mira, etc)., son estrellas del mismo tipo, de zonas múltiples. «Esta constitucion espectral, dice, indicio de grandes atmósferas absorbentes, induce á suponer que su variabilidad procede probablemente de crísis experimentadas por la atmósfera que las rodea.»

Vamos ahora á ver que estas crísis ocurren en las estrellas nuevas ó efímeras, en mucha mayor escala, pero sin periodicidad regular.

La reciente aparicion de la estrella nueva de la Corona boreal (mayo de 1866) ha dado ocasion oportuna para estos descubrimientos. Reproduzcamos lo que dicen los mismos observadores, Huggins y Miller:

«El espectro de la estrella variable de la Corona se presenta formado de dos espectros superpuestos, el primero consistente en cuatro rayas brillantes, y el segundo análogo al del Sol, resultando cada cual de la descomposicion de un haz luminoso independiente de la luz que da orígen al otro. El espectro continuo atravesado por grupos de rayas oscuras indica la presencia de un foto-esfera de materia incandescente, probablemente sólida ó líquida, rodeada de una atmósfera de vapores más frios, que producen por absorcion los grupos de rayas oscuras. Hasta aquí la constitucion de este astro es análoga á la del Sol, pero ofrece un espectro adicional compuesto de rayas brillantes, que denota la presencia de una segunda fuente de luz, que debe ser un *gas en extremo luminoso.* Además, las dos rayas brillantes principales de este espectro nos prueban que este gas se componia principalmente de hidrógeno, y su gran brillo demuestra que la temperatura del gas luminoso ha sido más elevada que la de la foto esfera. Estas circunstancias, agregadas á la repentina explosion de la luz en la estrella, á

su inmediàta y no ménos rápida disminucion de brillo, y á su tránsito en doce dias de la segunda á la octava magnitud, nos inducen á suponer que el astro ha quedado bruscamente rodeado de llamas de hidrógeno en combustion. Podria suceder que hubiese sobrevenido en él alguna gran convulsion con un enorme desprendimiento de gas puesto en libertad. Una gran parte de este gas era hidrógeno que ardia en la superficie de la estrella combinándose con algun otro elemento. Este gas inflamado emitia la luz caracterizada por el espectro de las rayas brillantes. El espectro de otra porcion de la luz estelar podia indicar que tan terrible deflagracion gaseosa habia caldeado y dado una vivísima incandescencia á la materia sólida de la foto-esfera. Cuando el hidrógeno libre se hubo agotado, la llama disminuyó gradualmente, la foto-esfera perdió gran parte de su luz, y la estrella volvió á su primitivo estado.»

«No debemos olvidar, añade Huggins, que la luz, á pesar de su rapidez, necesita cierto tiempo para llegar desde la estrella hasta nosotros. Por consiguiente, esta gran convulsion física, nueva para nosotros, era ya un suceso añejo relativamente á la estrella misma. En 1866, hacia ya muchos años que se hallaba en las nuevas condiciones que le ha creado tan violenta catástrofe.»

Esta última observacion es aplicable, segun hemos dicho más arriba, á todos los fenómenos celestes del mundo sidéreo. Los rayos de luz emanados de las estrellas van llegando continuamente á la Tierra despues de efectuar viajes cuya duracion se cuenta por años y probablemente por siglos.

No cabe duda de que las estrellas nuevas de 1672, y de 1504, y la estrella efímera tan extraordinariamente variable *eta* de Argos, son soles que, como la estrella de la Corona, han sido teatro de inmensas conflagraciones, en que el hidrógeno ha debido de entrar por mucho.

Otro tanto ha sucedido probablemente con la nueva estrella que apareció en la constelacion del Cisne á fines de 1876. Vista por primera vez en Atenas por M. Schmidt, el 24 de noviembre (cerca de la estrella *zeta* de la misma constelacion), la estrella nueva, muy amarilla, era entónces de tercera magnitud, más intensa que *eta* del Pegaso. M. Pablo Henry la observó en Paris á fines de noviembre habiéndole parecido de quinta magnitud y de color verdoso, casi azul. En diciembre, M. Cornu hizo el siguiente análisis de la luz de la nueva estrella:

Vió que su espectro se componia «de cierto número de rayas brillantes, que se destacaban sobre una especie de fondo luminoso, casi enteramente interrumpido entre el verde y el añil, de suerte que á primera vista le pareció formado de dos partes separadas.» Cornu designó las ocho rayas brillantes, con relacion á su brillo, con las ocho letras del alfabeto griego *alfa*, *beta*, *gamma*, *delta*, *epsilon*, *eta*, *zeta*, *theta*: *alfa*, *eta* y *epsilon* corresponden casi idénticamente á tres líneas del hidrógeno (C, F, y 434). *Delta* es la raya del sodio ó más bien la $D^3$ (helio) de la cromo-esfera solar; *beta* corresponde á la triple raya *c* del magnesio; pero lo más interesante es la coincidencia probable de las rayas *gamma* y *theta* con otras dos rayas, una de las cuales (1474 de Kirchhoff) es una de las rayas características de la cromo-esfera y de la corona, y la segunda se ve tambien en la cromo-esfera. «En resúmen, la luz de la estrella posee, al parecer exactamente, dice M. Cornu, la misma composicion que la envolvente del Sol llamada cromo-esfera.»

## III

### ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA LUZ DE LAS NEBULOSAS

El estudio telescópico de las nebulosas, de esa especie de nubes diseminadas en tan crecido número por las regiones sidéreas, habia dejado á los astrónomos en la incertidumbre de si todas ellas eran ó no irresolubles, es decir, de si podian descomponerse en estrellas; y si además de los cúmulos estelares, habia masas verdaderamente nebulosas, compuestas de una materia difusa que brillara con una luz *sui generis* probablemente incandescente. Podia pues suponerse que las nebulosas no resueltas por los telescopios más poderosos eran, como las demás, cúmulos de estrellas, pero demasiado lejanos para que fuese posible su descomposicion. Al análisis espectral le estaba reservada la solucion de tan interesante problema de astronomía física.

Indiquemos sucintamente los resultados alcanzados.

Corresponde á Huggins el honor de haber aplicado por primera vez el espectroscopio al estudio de la luz de las nebulosas, empezando por analizar en 1864 una de la constelacion del Dragon. Su espectro le pareció formado únicamente de tres rayas brillantes aisladas; por consiguiente no era el de un cúmulo de estrellas distintas, sino el de una verdadera nebulosidad, de una aglomeracion de materia gaseosa, luminosa é incandescente. La más brillante de las rayas observadas coincidia con la más marcada de las que son propias del nitrógeno; la más tenue con la raya verde del hidrógeno; y por fin la raya intermedia distaba poco de la del bario, pero no coincidia con ella. Las tres rayas brillantes se destacaban sobre una banda coloreada, formando un espectro continuo sumamente débil, casi sin anchura, como si proviniese de un punto luminoso situado en el centro de la nebulosidad. La nebulosa en cuestion, clasificada ántes entre las planetarias, tiene en efecto un núcleo pequeño, pero muy brillante. Huggins dedujo de esto que la materia que formaba dicho núcleo no se halla probablemente en estado de gas, como la que lo rodea, y que más bien es una niebla de partículas sólidas ó líquidas incandescentes.

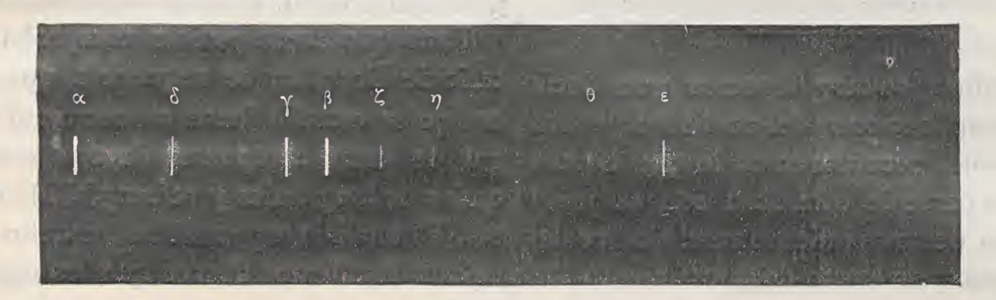


*Fig. 115.*—Espectro de la estrella efímera del *Cisne*

Huggins ha estudiado hasta setenta nebulosas, habiendo presentado la tercera parte de ellas una constitucion análoga á la del Dragon, y reduciéndose sus espectros á una ó muchas bandas; las demás han dado por el contrario espectros continuos. Esta proporcion de 1 á 2 entre las nébulas gaseosas y las estelares es quizás mayor de lo que daria el exámen espectroscópico de la totalidad de las nebulosas. Y en efecto, Huggins ha elegido más especialmente para sus estudios aquellas cuyos caracteres (forma y color) debian presentar en su concepto una constitucion gaseosa.

Entre las nebulosas de constitucion gaseosa y cuyo espectro se compone de tres rayas brillantes citaremos una de Acuario que aparecia en el telescopio de lord Rosse en forma de globo cortado por un anillo visto de canto, del propio modo que se ve á Saturno en una de sus fases; y además otra nebulosa de estructura parecida, pero cuyo anillo, visto de frente, rodea al globo luminoso. Una nebulosa espiral ha dado cuatro rayas brillantes. La nebulosa espiral de la Lira, así como Dumb-bell, la célebre nebulosa de la Zorra, tienen espectros de una sola raya brillante, que es la más viva de las tres rayas de la nebulosa del Dragon.

Finalmente, la gran nebulosa de *theta* Orion, que se parece á las anteriores por su color azulverdoso, ha dado tambien un espectro compuesto de cuatro rayas brillantes, bien definidas con sus intervalos enteramente oscuros: la más brillante y ménos refrangible coincide con una de las componentes de la doble raya del nitrógeno; la segunda es quizás una línea del hierro y las otras dos coinciden exactamente con las líneas F y G del hidrógeno. La nébula de Orion es pues otra nebulosidad gaseosa.

La constitucion de la de Andrómeda es muy distinta. Su espectro no consta ya de rayas brillantes, sino de una banda continua, pero aparece incompleto por faltar el rojo y parte del anaranjado. Ahora bien, los verdaderos cúmulos estelares, las nebulosas resueltas por el telescopio en puntos brillantes distintos tienen asimismo un espectro continuo, como por ejemplo el cúmulo de Hércules; resultado que concuerda perfectamente con las observaciones de Bond, que ha descompuesto en parte la nebulosa de Andrómeda contando en ella hasta 1500 estrellas diferentes.

En suma, de 60 nebulosas cuya luz ha analizado Huggins, 41 han dado un espectro continuo, y de estas, 10 son cúmulos estelares y 15 nebulosas consideradas por los astrónomos como resolubles en estrellas. No se ha podido resolver en estrellas ninguna de las 19 nebulosas que dan un espectro formado de rayas brillantes.

## IV

### EL ANÁLISIS ESPECTRAL Y LOS MOVIMIENTOS REALES DE LAS ESTRELLAS

Para terminar cuanto tenemos que decir acerca de las aplicaciones del análisis espectral á la astronomía, recordaremos lo que hemos dicho en otra parte de esta obra con respecto á la influencia del movimiento en el timbre del sonido. Cuando por efecto del movimiento del observador ó del cuerpo sonoro el foco del que emanan las ondas sonoras se aleja, el sonido se torna más grave, y si el foco se acerca, parece más agudo. Ya indicamos la razon de esta modificacion que consiste en que las ondas sonoras llegan al oído, durante el segundo período, en un tiempo dado, un segundo verbigracia, en mucho mayor número que si el cuerpo sonoro estuviera en reposo; el sonido parece entónces formado por mayor cantidad de vibraciones, y por lo tanto, más agudo; en cambio, durante el primer período, las vibraciones son ménos numerosas y disminuye el timbre del sonido. Virtualmente, las longitudes de onda han aumentado en el primer caso y disminuido en el segundo.

Pues bien, la luz es, como el sonido, producto de las vibraciones periódicas; las ondulaciones más rápidas ó más cortas son las que corresponden á las partes más refrangibles del espectro; las más largas ó ménos rápidas, á las partes de refrangibilidad menor.

Por consiguiente, el movimiento de un foco luminoso, dando por supuesto que su velocidad sea comparable con la de la luz, debe influir tambien en la aparente refrangibilidad de los rayos ó de las ondas que lo componen, y aumentar esta refrangibilidad si el foco se acerca al observador ó disminuir si se aleja de él.

M. Doppler fué el primero en llamar la atencion sobre la relacion que debe existir entre los colores de las estrellas y sus movimientos. En su concepto, todas las estrellas son blancas; pero las que se alejan parecen rojas, y las que se acercan tienen una luz que tira á verde ó azul. Pero, segun lo ha hecho notar el P. Secchi, con razon á nuestro parecer, la luz blanca contiene rayos más refrangibles que la morada, y otros ménos refrangibles que la roja. Así pues, el efecto del movimiento debe hacer perceptibles tanto unos como otros rayos, y siendo siempre igual la cantidad de los rayos de refrangibilidad diversa, el color no parecerá alterado.

Para que fuese posible comprobar la hipótesis de Doppler, se requeriria que la luz de cualquier estrella fuese monocromática, en lugar de estar compuesta de una multitud de ondas de longitudes y refrangibilidades distintas. El análisis espectral ha resuelto esta dificultad. Acabamos de ver que los espectros de las luces estelares están surcados, como el del Sol, de rayas ó bandas oscuras, y que ha sido posible identificar varias de ellas con las rayas espectrales de algunos cuerpos simples terrestres, por ejemplo, los metaloides, como el hidrógeno, ó metales como el magnesio, el sodio, el hierro, etc.

Supongamos pues, que el observador, estudiando el espectro de una estrella en el que una raya determinada revela la presencia del magnesio, se sirve del mismo espectro para analizar simultáneamente la luz de la estrella en cuestion y la artificial del magnesio. Si la Tierra y la estrella están en reposo relativo, dicha raya deberá coincidir perfectamente en los dos espectros superpuestos. Si por el contrario, la estrella se mueve, y se acerca ó se aleja con rapidez bastante grande, el observador notará que la raya del magnesio se desvia, ora hácia el morado ó bien hácia el rojo; la direccion y la medida de esta desviacion le permitirán calcular la velocidad con que el astro se mueve, y que es relativa, toda vez que comprende la velocidad misma de nuestro planeta y la del sistema solar en el momento de la observacion.

Investigacion sobremanera difícil es esta, porque áun cuando la velocidad de la estrella sea considerable, la desviacion que se ha de medir es muy pequeña. Los primeros astrónomos que aplicaron este método al estudio de los movimientos estelares, como Huggins y

Miller, Maxwell y Secchi, no lograron buen éxito al principio, pero el perfeccionamiento de los métodos de observacion ha dado por fin resultados satisfactorios. En 1868 Huggins consiguió notar un ligerísimo cambio de refrangibilidad en una línea del espectro de Sirio, y dedujo de sus medidas que la estrella y la Tierra se apartaban entónces con una velocidad comprendida entre 42 y 58 kilómetros por segundo. Era preciso deducir la componente, en la direccion de Sirio, de la velocidad propia de la Tierra en su órbita (velocidad que se conoce siempre en la época de la observacion) para averiguar la verdadera de la estrella. Hechas las correcciones necesarias, Huggins pudo asegurar que Sirio se alejaba de nosotros en dicha época recorriendo de 29 á 35 kilómetros en el sentido del rayo visual.

El mismo observador por una parte, y M. Cristie, astrónomo del Observatorio de Greenwich por otra, estudiaron y midieron posteriormente los movimientos de cierto número de estrellas, y sus resultados concordantes atestiguan en favor de esta nueva y curiosa aplicacion del análisis espectral á las cuestiones astronómicas.

# CAPITULO IX

## LAS RADIACIONES SOLARES LUMINOSAS CALORIFICAS Y QUIMICAS

### I

### COEXISTENCIA DE LAS PROPIEDADES LUMINOSA, CALORÍFICA Y QUÍMICA DEL ESPECTRO

De los experimentos descritos en el capítulo VII se desprende que todo haz de luz blanca se compone de una porcion de radiaciones que difieren por su grado de refrangibilidad y por su color. Si la luz descompuesta por el prisma pertenece á un sólido ó á un líquido incandescente, por ejemplo á un baño de platino fundido (al blanco brillante), el espectro es continuo; contiene radiaciones cuya refrangibilidad va creciendo por grados insensibles, desde el rojo oscuro hasta el extremo morado. Si la luz procede de un gas, el espectro está, por el contrario, formado de cierto número de rayas brillantes separadas por espacios oscuros más ó ménos anchos. Si finalmente, la luz emana de un foco que por sí solo daria un espectro continuo, y atraviesa además un medio absorbente, una atmósfera gaseosa más ó ménos compleja, entónces el espectro presentará mayor ó menor número de rayas negras: su continuidad quedará interrumpida por estas líneas, que corresponden precisamente á las rayas brillantes que darian las sustancias de la atmósfera absorbente, si se analizara su luz aisladamente con el prisma: tal es el espectro de la luz del Sol.

Como se ve, dos caracteres distinguen á las varias radiaciones, la *refrangibilidad* y el *color*; propiedades ambas indisolublemente unidas entre sí, de suerte que á un rayo luminoso de refrangibilidad determinada corresponde siempre el mismo color ó el mismo matiz.

Sabemos ya (y en breve volveremos á ocuparnos de este asunto al exponer la teoría de la luz) que la causa de los fenómenos luminosos procede de un movimiento vibratorio de los focos, movimiento que se propaga por el éter en forma de ondulaciones sumamente rápidas y cortas, contándose por billones el número de vibraciones efectuadas en un segundo por una molécula de éter, y midiéndose por millonésimas de milímetro la longitud de onda ó el camino recorrido por la ondulacion en el mismo espacio de tiempo. Este fenómeno es análogo al de las ondas sonoras, excepto en lo que respecta al número y á la medida y tambien al modo de propagacion.

Hemos visto que los sonidos difieren de *timbre* y que este elemento depende del número de vibraciones en la unidad de tiempo del foco sonoro, al paso que la fuerza ó intensidad del sonido está íntimamente unida con la amplitud de las ondas. En los fenómenos luminosos, el número de vibraciones ó la longitud de onda es lo que diferencia las radiaciones en cuanto

á la refrangibilidad ó al color; de suerte que el color de la luz viene á equivaler al timbre del sonido, y la intensidad luminosa podria medirse tambien por la amplitud de las ondulaciones etéreas.

Finalmente, hay otra analogía entre el sonido y la luz. Así como la escala de los sonidos perceptibles bajo el punto de vista del timbre está comprendida entre dos límites, uno inferior y otro superior, así tambien las radiaciones luminosas lo están entre dos extremos, que son los límites del espectro visible. La luz solar, que es el más poderoso de todos los focos conocidos, está formada de radiaciones que se extienden un poco más allá de la raya A de Frauenhofer hácia el lado del rojo y algo más allá de la raya H en el morado.

Sin embargo, estos límites sólo son relativos en cuanto á las radiaciones capaces de producir alguna impresion en la retina y de determinar en nosotros la sensacion de la luz. Pues bien, esta propiedad que tienen las radiaciones solares de ser percibidas por el ojo es puramente subjetiva, es decir, depende únicamente de la conformacion de nuestro órgano visual y de nuestra sensibilidad, que es una aptitud puramente fisiológica. En realidad, dichas radiaciones poseen además otras dos propiedades; una de ellas consiste en calentar los cuerpos, la otra en modificar en diferentes grados ciertas sustancias, produciendo combinaciones ó descomposiciones químicas. En una palabra, las radiaciones solares no son *luminosas* solamente, sino que al propio tiempo son *caloríficas* y *químicas*.

No era posible estudiar con provecho estas propiedades, que coexisten en un mismo haz de luz solar, sino sometiéndolas al análisis prismático, como se hizo con los rayos de diferentes refrangibilidades. Pues bien; del estudio de los tres espectros, luminoso, calorífico y químico, ha resultado una consecuencia de grandísimo interés; á saber, que el espectro comprendido entre las rayas A y H de Frauenhofer no representa ni con mucho la verdadera extension del espectro solar completo, ó si se quiere, que más allá de las radiaciones luminosas las hay caloríficas y tambien químicas. Antes de describir los experimentos merced á los cuales se ha averiguado así, entremos en algunos detalles acerca de las intensidades relativas de las varias partes que componen el espectro luminoso, ó lo que es lo mismo, acerca del brillo de los diferentes colores del espectro solar.

Cuando se comparan en un mismo espectro las intensidades luminosas de los siete colores primitivos, se reconoce al punto que la parte más brillante está en el amarillo. Desde este color el brillo va disminuyendo, tanto hácia la parte del extremo rojo como hácia la del morado. Además, se ve que se puede dividir naturalmente los colores en dos clases, comprendiendo en la primera los *luminosos*, como el rojo, el verde y el amarillo; y en la segunda los *oscuros*, azul, añil y morado, á los cuales pueden agregarse los rayos del extremo rojo. Mediante un sencillo experimento se puede juzgar, ya que no medir, la diferencia que existe entre el poder lumínico de varios colores: ábrase un libro cualquiera, y recibiendo el espectro en la parte impresa de sus páginas, se verá que los caractéres serán perfectamente legibles en el anaranjado, amarillo y verde, al paso que costará trabajo discernir los que reciben los otros colores. Procediendo de este modo, y averiguando cuál era la mayor distancia á que podia leer en las diferentes regiones del espectro, vió Herschel que la principal intensidad luminosa estaba en el amarillo y en el verde.

Segun Frauenhofer, que ha estudiado fotométricamente las intensidades luminosas de los colores del espectro, el máximum de brillo se halla entre las rayas D y E, en el límite del amarillo; pero este punto está más inmediato á D, y su distancia á esta última línea viene á ser la décima parte del intervalo total DE. Otros métodos más precisos han permitido apreciar numéricamente los poderes lumínicos del espectro en los puntos en que lo cortan las ocho rayas principales de Frauenhofer. Fijando en 1000 el brillo máximo, las intensidades luminosas á que nos referimos son las siguientes:

| Colores. | Intensidades luminosas. | Rayas. |
|---|---|---|
| Extremo rojo. | insensible | A |
| Rojo. | 32 | B |
| | 94 | C |
| Anaranjado. | 640 | D |
| Amarillo. | 1000 | » |
| Verde. | 480 | E |
| Azul. | 170 | F |
| Añil. | 31 | G |
| Extremo morado. | 6 | H |

Cuando tratemos de los procedimientos que constituyen la fotometría, que tiene por objeto la comparacion de las intensidades luminosas, diremos cómo han podido efectuarse estas medidas. Miéntras tanto haremos observar que no pueden ser muy exactas, porque dicha comparacion no es rigorosamente posible sino entre luces del mismo tono ó matiz, lo cual no sucede con las regiones del espectro, cuyos colores son tan desemejantes.

## II

### RADIACIONES CALORIFICAS DEL ESPECTRO.—ESPECTRO ULTRA-ROJO

¿El calor de los rayos solares se distribuye con igualdad por toda la extension del espectro, ó por el contrario, tienen los diferentes rayos de colores, además de distinta intensidad luminosa, poderes caloríficos desiguales? A esta cuestion, há largo tiempo planteada, no respondieron en un principio los físicos sino con una hipótesis que parecia bastante natural; que la intensidad de la radiacion calorífica era proporcional en el espectro á la intensidad de la luminosa, hipótesis que pareció confirmada por los experimentos de Rochon y Sennebier. Segun estos, los rayos más luminosos eran tambien los más calientes, de suerte que creyeron situado el máximum de calor en el amarillo, pero muy luégo aseguraron otros físicos que este máximum estaba en el rojo, ó en el extremo de este color.

En 1800 ocupóse prácticamente sir W. Herschel de este interesante asunto: fué pasando la bola de un termómetro por las regiones sucesivas de un espectro formado con un prisma de flint, y vió que la temperatura iba creciendo desde el morado hasta el rojo. Ocurriósele en vista de esto la idea de llevar más adelante el experimento, y observó con sorpresa que el máximum de calor estaba más allá del extremo rojo, en un punto en que la vista no percibia el menor asomo de luz, de lo cual dedujo la consecuencia de que en la luz solar hay radiaciones invisibles que producen calor y cuyo grado de refrangibilidad es menor que el de los rayos rojos del espectro luminoso. Herschel no pudo determinar el límite de esta parte del espectro calorífico; contentóse, dice Brewster, con cerciorarse de que hasta en un punto distante pulgada y media (38 milímetros) del extremo rojo, los rayos invisibles tenian un calor considerable, aun estando el termómetro á 52 pulgadas ($1^{m},32$) del prisma.»

Acabamos de ver que se halló el máximum de calor en diferentes puntos del espectro, ora en el amarillo (Rochon y Sennebier), ora en el rojo ó precisamente en el extremo rojo (Bérard), ó bien más allá del rojo (Herschel). Segun Seebeck (1828), todas estas opiniones son ciertas, porque resultando el calor trasmitido por los rayos de colores absorbido con desigualdad segun la naturaleza del prisma, de la sustancia de éste debe depender la posicion del máximum calorífico. Y en efecto, este físico hizo ver que los rayos caloríficos más intensos son los del amarillo, del anaranjado, del rojo ó del extremo rojo, segun que se haya dispersado la luz solar con prismas formados con agua ó alcohol, ácido sulfúrico concentrado, vidrio ordinario, ó crown-glass ó flint-glass inglés.

Los experimentos de Melloni demostraron que los resultados obtenidos de tal suerte relativamente á la posicion del máximum de temperatura en el espectro, no son contradictorios. Consisten en que hay una absorcion de rayos caloríficos que depende á la vez de su refrangibilidad y de la sustancia del prisma. Como la sal gema absorbe poco ó nada el calor, ya sea este oscuro ó luminoso, ningun prisma es más á propósito que el de dicha sal para comparar los poderes caloríficos de los varios rayos coloreados. Haciendo uso de él, Melloni ha demostrado que la temperatura de estos rayos va creciendo del morado al rojo, hallándose el máximum mas allá del rojo, en la prolongacion del espectro, á una distancia del límite extremo del rojo igual á la que media entre este límite y el azul-verde. Más allá el calor disminuye, pero todavía se nota cuando se llega á una distancia del rojo igual á toda la extension del espectro luminoso. Muller y Franz han reproducido los experimentos de Melloni.

Segun este último físico, «el máximum de temperatura en el espectro calorífico normal del Sol no se halla siempre en la misma posicion, sino unas veces más próximo y otras más remoto del límite rojo, áun cuando la atmósfera presente en apariencia la misma limpidez en

los distintos dias en que se haga el experimento.» Melloni atribuye estos cambios, que se notan solamente en las radiaciones oscuras sin afectar á las intensidades relativas de las luminosas, á las diferencias de humedad de las capas inferiores ó superiores de la atmósfera, la cual debe estar por lo mismo dotada de una especie de *coloracion calorífica* ó de *termocrosis*.

Tyndall tomó por foco la luz del arco voltaico, y operando con un prisma de sal gema, vió que la radiacion calorífica se extendia más allá del lado de los rayos ménos refrangibles de lo que se extiende en el espectro solar. Este resultado viene en apoyo de la opinion de Melloni, de que la atmósfera obra por absorcion en las radiaciones oscuras más refrangibles de los rayos solares.

## III

### RADIACIONES QUIMICAS DEL ESPECTRO. — ESPECTRO ULTRAMORADO

Conocida es la influencia de la luz del Sol en los colores materiales, cuando se ha estampado ó teñido con ellos las telas, el papel, la madera ó cualesquiera otras sustancias orgánicas. Los cortinajes se decoloran á la luz del dia y los lienzos crudos de tinte amarillento blanquean si se los pone al sol. Hoy nadie ignora ya cuán necesaria es la luz para el completo desarrollo, para la salud y hasta para la vida de los animales y de los vegetales. Pues estas múltiples influencias, de las cuales tendremos que volver á ocuparnos, consisten, en último análisis, en una serie de acciones químicas, en descomposiciones ó combinaciones de sustancias. El cloro y el hidrógeno que, en la oscuridad, no ejercen accion alguna uno sobre otro, se combinan y forman ácido clorhídrico cuando se les pone á la luz. Si el frasco que los contiene se coloca en un sitio alumbrado por la luz difusa del dia, la combinacion se efectúa lentamente; pero á los rayos solares, bruscamente y con explosion. La luz descompone las sales de oro, de plata y de platino. La heliografía, descubierta por Niepce y Daguerre, y todos los actuales procedimientos de fotografía están basados en la accion química de los rayos luminosos, ya procedan del Sol, ó de la Luna ó de otros focos de suficiente intensidad. Más adelante describiremos estos procedimientos; bástenos por ahora tomar nota de los fenómenos.

Aquí se presenta la misma cuestion que con los poderes lumínicos y caloríficos: trátase de saber si las diferentes regiones del espectro solar están dotadas de igual facultad bajo el punto de vista químico, ó si varía su eficacia de una á otra.

Scheele, que ya desde 1777 habia notado la accion de la luz sobre el cloruro de plata, reconoció tambien que los rayos coloreados del espectro obran con desigualdad para producir dicha accion. Seebeck reconoció en seguida que las radiaciones químicas aumentan de intensidad del rojo al morado, en términos de que el cloruro susodicho se ennegrece en pocos minutos cuando recibe los rayos concentrados de la parte morada del espectro, al paso que necesita muchas horas para ello cuando recibe los rayos del verde al rojo. Siguieron á continuacion las observaciones de Wollaston y de Ritter, las cuales probaron que más allá del extremo morado, en la parte oscura del espectro, la accion química continúa á considerable distancia de la parte luminosa. La intensidad de la radiacion química que varía, con respecto á una misma sustancia, segun la posicion de los rayos en el espectro, no llega á su máximum en el mismo punto si se trata de sustancias diferentes. Este máximum no es el mismo para las sales de plata que para las de oro, ni para estas que para las de potasa.

Estudiando J. Herschel en 1840 la accion del espectro solar en sustancias químicamente impresionables, dedicóse á averiguar si en el espectro químico hay interrupciones correspondientes á las que indican las rayas negras del espectro luminoso, pero no pudo lograrlo. Poco despues se ocupó Edmundo Becquerel del mismo asunto: hé aquí cómo describe este sabio los procedimientos de observacion merced á los cuales obtuvo un éxito completo:

«El método de que me valí, dice, consiste en proyectar sobre una pantalla un espectro producido por un prisma de flint-glass muy puro y un anteojo de un metro de foco, colocado inmediatamente detrás del prisma á dos metros de la ranura por la que penetran los rayos solares: la pantalla estaba situada á unos dos me-

tros tambien del anteojo, y preparada para poner en ella papeles impregnados de materias impresionables (sales de plata, etc.), ó bien placas ioduradas. Despues de una exposicion más ó ménos larga, aparece marcado en las superficies impresionables un crecido número de rayas, y midiendo sus distancias respectivas, se ve que entre A y H, estas rayas son las mismas que para los rayos luminosos y que ocupan exactamente los mismos sitios... Más allá de H, el espectro químico tiene una infinidad de rayas; hasta M, poco más ó ménos, son las mismas que las del espectro luminoso; más allá los rayos luminosos siguen debilitándose y ya no se las puede comparar con ellos.»

Varios físicos, entre ellos Muller, Draper y Mascart, han estudiado el espectro de las radiaciones ultra-moradas. Valiéndose el último de prismas de espato de Islandia, determinó la posicion de 700 rayas distintas.

Por lo que respecta á la intensidad de los rayos químicos del espectro solar, varía con su refrangibilidad, y tambien con la naturaleza de las sustancias impresionables, de suerte que si se trazan curvas de la actividad química como se han trazado de las intensidades luminosas y caloríficas, las máxima y mínima de estas curvas variarían segun las sustancias.

Para medir la accion química de las diferentes regiones del espectro, ha empleado Becquerel un método que consiste en apreciarla por la intensidad de las corrientes eléctricas que engendra, habiendo visto que la curva de las intensidades de las radiaciones químicas coincide casi con la de las radiaciones luminosas hasta cierto punto en que hay un mínimum; más allá y hácia el morado, vuelve á crecer, llega á otro máximum y luégo decrece rápidamente hasta llegar á ser casi nula la actividad química.

## IV

### IDENTIDAD DE LAS TRES RADIACIONES, LUMINOSA, CALORÍFICA Y QUÍMICA

Tal es, en resúmen, la composicion de la luz, ó mejor dicho, de la radiacion solar.

Cualquier haz de esta radiacion se compone de un número indefinido de rayos que difieren entre sí por su refrangibilidad, pero teniendo como carácter comun el de seguir todos á su paso por los medios refringentes las leyes de la refraccion tal cual las hemos expuesto en un capítulo anterior. Los índices de refraccion de estas radiaciones elementales van en progresivo aumento, aunque no de un modo contínuo, pues se observan vacíos, como lo prueban las rayas que en crecido número surcan el espectro solar, cada una de las cuales marca la carencia de la radiacion especial que tendria el índice correspondiente.

Acabamos de decir que las radiaciones solares diferian por su refrangibilidad; pero tambien difieren por su modo de accion. Las radiaciones medias, que son las que constituyen la parte luminosa del espectro solar, tienen la propiedad especial de afectar nuestra retina; además, á medida que su refrangibilidad crece, la impresion luminosa varía de intensidad así como de color. Esta sensacion compleja no existe sino en el haz descompuesto; ántes de atravesar el prisma, todas estas luces y estos colores reunidos producen en nosotros la impresion de la luz blanca, cuya definicion se reduciria á decir que es la reunion de rayos de todos los grados de refrangibilidad.

Las radiaciones solares no sólo se manifiestan por la sensacion de la luz que producen sino tambien por su actividad calorífica, por la propiedad que tienen de calentar los cuerpos, elevando su temperatura. Pero los grados de esta propiedad no crecen al par de los de la intensidad luminosa, sino que aumentan conforme va disminuyendo la refrangibilidad. Además, léjos de quedar limitada esta actividad calorífica á las radiaciones luminosas, traspasa sus límites á una y otra parte, y llega á su máximum fuera del espectro, más allá del rojo. En una palabra, cuando á causa de una disminucion suficiente de refrangibilidad, han cesado las radiaciones de impresionar nuestra retina, ejercen todavía su accion en los cuerpos, siendo entónces esta accion exclusivamente calorífica.

Hay aún otra propiedad que caracteriza á las radiaciones solares; propiedad que se llama química, porque consiste en combinaciones ó descomposiciones de ciertas sustancias, calificadas por esto de *impresionables*. Sólo que la intensidad de esta actividad especial, variable con la refrangibilidad, lo es tambien cuando se expone á los rayos solares tal ó cual sustancia

particular. Generalmente se reconoce que las radiaciones solares son tambien químicas, que siguen á corta diferencia la misma ley de variacion de intensidad. Pero hácia la parte ménos refrangible del espectro, hay radiaciones oscuras casi exclusivamente químicas.

Esta composicion compleja de la radiacion solar, esta triple propiedad calorífica, luminosa y química de los rayos desigualmente refrangibles, ¿consiste en que hay en realidad rayos de tres distintas clases, produciendo los unos calor, los otros luz y los otros actividad química, ó las mismas radiaciones elementales son las que ocasionan estos tres efectos?

Los físicos admiten esta última hipótesis. En breve veremos las nuevas razones en que se apoyan para admitir la identidad de las tres radiaciones; pero desde luégo podemos indicar que es imposible distinguirlas por su refrangibilidad, puesto que todas siguen la ley de Descartes, y que allí donde el análisis espectral marca un vacío ó una raya oscura en el espectro luminoso, lo hay tambien para los espectros calorífico ó químico.

# CAPÍTULO X

## MANANTIALES DE LUZ.—ORIGEN Y TRANSFORMACIONES DE LAS RADIACIONES

### I

### LA INCANDESCENCIA.—INCANDESCENCIA DE LOS SÓLIDOS Y DE LOS LÍQUIDOS

Todos los cuerpos, sólidos, líquidos y gaseosos, elevados á un alto grado de temperatura, se vuelven luminosos en la oscuridad, hallándose entónces en estado de *incandescencia*. Este fenómeno va acompañando con frecuencia de combinaciones químicas que resultan principalmente entre uno ó muchos elementos del cuerpo y el oxígeno del aire, habiendo entónces combustion. Diariamente presenciamos ejemplos de casos de este género. El fuego no es otra cosa sino la incandescencia de un cuerpo, es decir, el desprendimiento de luz y calor del seno de una masa de materias orgánicas ó minerales, cuya temperatura se ha elevado hasta cierto grado. Además de las partes sólidas, convertidas en luminosas, como brasas de leña ó de carbon, de hulla ó de coke, el fuego contiene llamas más ó ménos vivas, esto es, gases incandescentes.

Pero hay que distinguir entre la incandescencia simple de los sólidos y aún de los líquidos, que puede presentarse sin que haya combustion ó cuando la combustion propiamente dicha ha cesado, y la incandescencia producida por las combinaciones químicas. La mayoría de los metales se enrojece al fuego; pero unos, ántes de tornarse luminosos, cambian de estado y se funden, al paso que el metal líquido se vuelve rojo á su vez, sin que haya habido combustion. Las piedras, el vidrio, la tierra, etc., se enrojecen del mismo modo.

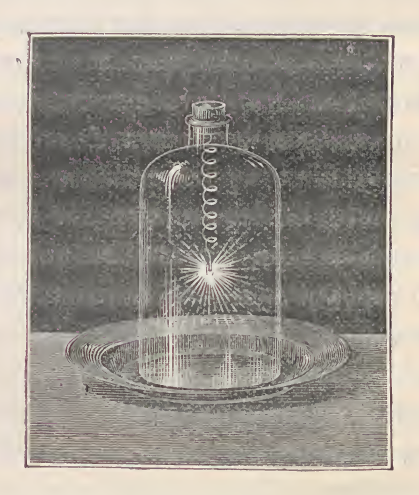


*Fig. 116.*—Combustion del hierro en el oxígeno

En cambio tenemos un ejemplo de un metal hecho incandescente por la combustion, inflamando una espiral de acero en una campana llena de oxígeno y de la cual brotan chispas brillantes (fig. 116). Una combinacion química, la del oxígeno con el hierro, es la que produce en este caso la elevacion de temperatura.

Lo contrario sucede con la madera y otras sustancias orgánicas y vegetales, que se des-

componen ardiendo, y desprenden gases que arden tambien en forma de llamas más ó ménos vivas y coloreadas. El carbon vegetal y el coke arden casi sin llama; verdad es que estos cuerpos han sufrido ya una combustion parcial.

¿Se vuelven luminosos todos los cuerpos á una misma temperatura? Si así es, ¿á qué temperatura empiezan á emitir bastante luz para



*Fig. 117.*—Mechero de Bunsen

ser luminosos en la oscuridad? Admitíase generalmente que todos los cuerpos comienzan á emitir luz entre los 500° y 600° centígrados, luz al principio débil y de color rojo oscuro. Pero Becquerel ha hecho algunos experimentos relativos á este asunto, de los cuales resulta que «sin incurrir en gran error, se puede adoptar un término comprendido entre los 480° y 490° como límite en el que empiezan los cuerpos sólidos á emitir algun indicio de luz en la oscuridad por la accion del calor, ó bien en números redondos el de 500°, que es el término generalmente admitido como el límite en que las sustancias empiezan á hacerse visibles en un recinto escasamente alumbrado.» El mismo límite de temperatura, ó sea el de 500°, es el que marca la incandescencia de los cuerpos muy poco luminosos, por ejemplo, la de los gases y las llamas, de que hablaremos en el artículo siguiente.

Si se eleva más y más la temperatura sobre el referido límite de 500°, la intensidad de la luz emitida va aumentando, y su color cambia tornándose cada vez más blanco, lo que equivale á decir que se compone de rayos más refrangibles; «de suerte, dice Becquerel, que á una temperatura que no exceda mucho de la de fusion del oro, la luz emitida es ostensiblemente blanca, y da rayos comprendidos entre los límites de refrangibilidad de las rayas oscuras A y H que terminan los dos extremos visibles del espectro solar.»

Véase, por lo que atañe al platino, á qué temperaturas se obtienen las diversas tintas que se suceden desde el rojo oscuro hasta el blanco más intenso, y que se han determinado, con sólo una diferencia de 50°, con el pirómetro de Pouillet:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Rojo naciente.. . . . | 525° | Anaranjado oscuro. . . | 1100° |
| Rojo oscuro. . . . . | 700 | Anaranjado claro. . . | 1200 |
| Cereza naciente. . . . | 800 | Blanco. . . . . . . | 1300 |
| Cereza. . . . . . . | 900 | Blanco mate. . . . . | 1400 |
| Cereza claro. . . . . | 1000 | Blanco deslumbrador. . | 1500 |

De los experimentos hechos por Becquerel resulta que cierto número de cuerpos opacos, los metales inoxidables como el platino y el paladio, el carbon, el asbesto y la cal, tienen casi la misma potencia de radiacion á medida que la temperatura se eleva; los metales oxidables, como el cobre, están dotados hasta sus puntos de fusion de menor radiacion, lo cual consiste sin duda en la capa de óxido que los rodea; pero una vez llegados al punto de fusion, la intensidad de su luz es casi igual á la del platino. En cambio, la plata incandescente da siempre una luz más viva y blanca que la de este último metal.

Los físicos Draper, Zoellner y Becquerel han tratado de valuar la intensidad de la luz emitida por el platino ó cualquier otro cuerpo incandescente á temperaturas cada vez más elevadas, y de sus experimentos resulta que dicha intensidad crece con rapidez suma.

«Representando por la unidad, dice E. Becquerel, la intensidad de la luz emitida en el momento de la fusion de la plata (916°) por un cuerpo como el platino ó un fragmento de magnesia ó de cal puesto á su lado, á 600° no hay más que unas 3 milésimas de esta intensidad luminosa, á 700°, 2 céntimos, á 800° un octavo, y á 900° los tres cuartos. Tomando por punto de comparacion la fusion del oro (1037°), la intensidad luminosa por radiacion seria más de 8 veces mayor que refiriéndola á la fusion

de la plata, y 69 veces refiriéndola á la del cobre: á 1200° esta intensidad seria 147 veces mayor; á 1500°, en esta hipótesis, cerca de 29,000 veces, y á 2,000°, límite de las observaciones con el carbon polar positivo de una pila, 191 millones de veces; pero estos dos últimos números suponen que la ley de crecimiento de

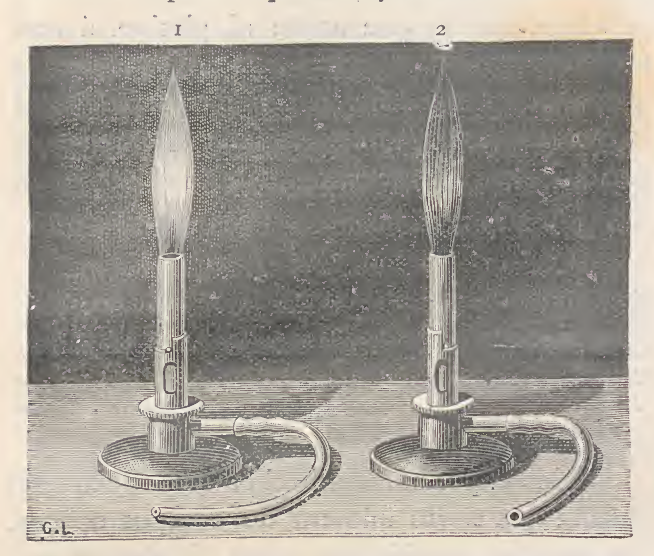



*Fig. 118.*—Llama de hidrógeno carbonado: 1, luminosa y poco caliente; 2, muy caliente y poco luminosa

la intensidad luminosa sigue siendo la misma más allá de 1,200°, lo cual no está probado.»

Circunscribiendo al límite de los experimentos los resultados obtenidos de tal suerte, tenemos que la luz emitida por un cuerpo sólido incandescente es 45,900 veces más intensa á los 1,200° de temperatura que á los 600°, siendo esta última la del rojo oscuro.

La luz emitida por un sólido ó un líquido incandescente goza de una propiedad característica puesta en evidencia por Arago, y de la que trataremos en otro capítulo; presenta indicios de polarizacion bajo un ángulo suficientemente pequeño. «Se ha creido largo tiempo, dice, que la luz que emana de todo cuerpo incandescente llega al ojo en estado de luz natural, cuando en su camino no se ha reflejado parcialmente, ni refractado en demasía; lo cual es un error, porque yo he reconocido que la luz que emana, bajo un ángulo suficientemente pequeño, de la superficie de un cuerpo sólido ó de un líquido incandescente, áun cuando esta superficie no sea enteramente lisa, presenta indicios evidentes de polarizacion, de modo que al penetrar en el anteojo polariscópico, se descompone en dos haces coloreados. Por el contrario, la luz que emana de una sustancia gaseosa inflamada, de un gas parecido al que alumbra nuestras calles, se halla siempre en su estado natural, cualquiera que sea su ángulo de emision.»

Otro carácter distintivo de la luz de los sólidos y de los líquidos incandescentes consiste en que se compone de rayos que tienen, en los límites extremos de su refrangibilidad, todas las longitudes de onda; en otros términos, su espectro es continuo; no contiene rayas oscuras, ni rayas ó bandas brillantes (1).

## II

### INCANDESCENCIA DE LOS GASES

Un chorro de gas hidrógeno puro que arda en el aire ó tambien en el oxígeno, da una luz de escasa intensidad, por más que su temperatura sea muy elevada; pero si se introduce en él un alambre de platino, un fragmento de cal ó de magnesia, desarróllase al punto una luz deslumbradora, originada por la incandescencia de las materias sólidas metálicas ó refractarias, elevadas por el gas á un excesivo grado de temperatura.

Aun cuando los gases se tornan luminosos como los cuerpos líquidos ó sólidos á los 500° próximamente de temperatura, tienen por lo regular una potencia de radiacion más débil que dichos cuerpos; la elevacion de temperatura aumenta en corta proporcion su energía lumínica, de suerte que la llama que puede convenir perfectamente como foco de calor, apénas es sensible como foco de luz. Tal es la llama del mechero de Bunsen, alimentada por el gas del alumbrado mezclado con aire; esta llama es tan caliente como poco luminosa.

La llama del óxido de carbono es tambien, como la del hidrógeno, de escasa intensidad, y su tinta ligeramente azulada. La del soplete de gas oxi-hidrógeno, cuya temperatura llega á 2,500°, apénas es visible á la luz del dia.

E. Becquerel atribuye á la trasparencia de las llamas ó de los gases incandescentes su reducida potencia iluminadora, cuando no contienen ningun cuerpo sólido en suspension. «La

(1) Anteriormente hemos visto que hay una ó dos excepciones, el erbio por ejemplo, cuya luz da un espectro discontinuo de rayas brillantes, como los de los vapores metálicos.

llama que resulta de la combustion del hidrógeno puro es muy poco luminosa, porque sólo da lugar á la produccion de un cuerpo trasparente, es decir, al vapor de agua; pero si en el interior de esta llama se introduce un cuerpo opaco, como platino, cal ó magnesia, al punto se caldea este cuerpo sólido y da una luz vivísima. Si se mezcla el hidrógeno con gas carbonado, la llama que esta mezcla produce en el aire se torna lumínica á causa de la presencia de partículas carbonosas que proceden de la descomposicion del gas y que arden al mismo tiempo que él.»

De todos estos hechos y de su interpretacion se deduce la explicacion de la potencia lumínica de las llamas, dada por primera vez por Davy. Adúcese tambien en apoyo de esta teoría una serie de experimentos de los cuales vamos á indicar los más notables.

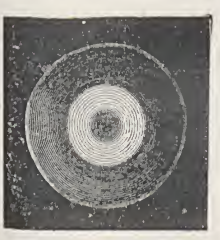


*Fig. 119* —Estructura de la llama de una bujía y corte de la misma llama

Si ántes de inflamar el hidrógeno puro se hace pasar este gas por la bencina, que es un carburo de hidrógeno muy volátil, resulta, en lugar de una llama apénas visible, otra brillantísima; al atravesar el gas el líquido carburado, ha arrastrado consigo partículas en estado de vapor, que descompuestas por la elevada temperatura, se precipitan y vuelven incandescentes.

El análisis de la llama de una bujía es una prueba de la misma verdad. En el centro hay un cono C, relativamente oscuro y de baja temperatura, toda vez que se puede introducir en él un grano de pólvora sin que arda; este núcleo está formado de vapor de ácido esteárico. Alrededor de este cono hay una envoltura A que forma la parte más luminosa de la llama, y donde la actividad de la combustion descompone los carburos hidrogenados, precipitando en estado de ténue polvo el carbono cuya alta temperatura determina la incandescencia. El hidrógeno rodea en seguida dicha envoltura con otra B, oscura, pero muy caliente, y por último en D, en la base de la llama, hay un casquete de fulgor azul oscuro, que se atribuye á la reaccion de un exceso de aire puro sobre el gas hidrocarbonado.

Poniendo sobre la llama un pedazo de tela metálica, se nota directamente la presencia del carbon en la parte luminosa por el depósito de negro de humo que se forma en la tela en la zona correspondiente. Obtiénese análogo resultado acercando á la llama un trozo de porcelana blanca, en el cual se forma un depósito de hollin.

Lo propio ocurre con el gas del alumbrado; pero si este gas se mezcla con aire ántes de la combustion,—como en el mechero de Bunsen,—arde casi sin dar luz, y por consiguiente, en la tela metálica ó en el trozo de porcelana no aparece entónces ningun depósito de negro de humo ó de hollin.

Esta teoría de Davy, hasta el presente por todos admitida, explica perfectamente la radiacion de las llamas en que precipitándose á una alta temperatura ciertas partículas sólidas, se vuelven incandescentes. La viva luz del fósforo, del zinc y del magnesio tiene tambien así su explicacion; lo propio acontece con la luz del arco voltaico, que resulta de la radiacion del carbono producida, no ya por una combinacion química, sino por la extraordinaria intensidad

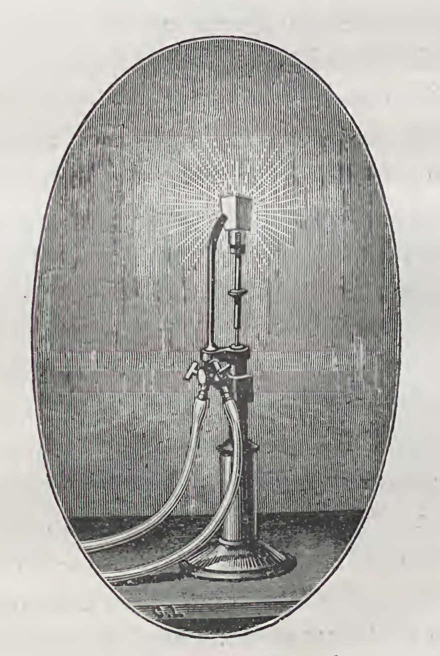


*Fig. 120.*—Luz de Drummond

de calor que el paso de la electricidad desarrolla entre los electrodos.

Sin embargo, los recientes experimentos del químico inglés Frankland parecen probar que la teoría de Davy no basta para explicar la potencia lumínica de las llamas; á lo ménos,

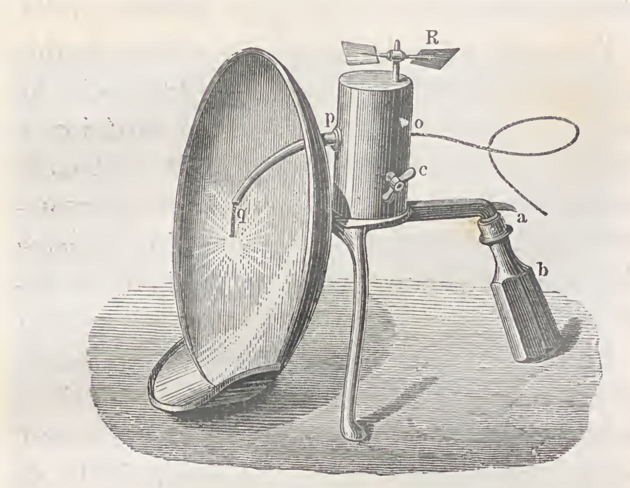



*Fig. 121*—Lampara de magnesio

dichos experimentos prueban que los gases incandescentes pueden adquirir una facultad de radiacion considerable sin que haya partículas sólidas en suspension, y que basta para ello que la presion aumente. Por ejemplo, una mezcla de oxígeno y de hidrógeno metida en burbujas de jabon da cuando se la inflama una fuerte explosion, pero tambien una luz muy débil. El mismo experimento hecho en una vasija resistente en que no puede efectuarse la expansion producida por la combustion, da una luz muy viva. Se obtienen análogos resultados con el hidrógeno y el cloro, con el óxido de carbono y el oxígeno.

Otro experimento de Frankland, en contradiccion con la teoría de Davy, es el siguiente: el arsénico metálico arde en el oxígeno con luz blanca muy intensa, cuya temperatura no excede de 218°; luego la radiacion no dimana de partículas sólidas, pues estas no se hacen incandescentes sino á los 500°. Sin embargo, el espectro de la luz es continuo. Iguales resultados le dieron el bisulfuro de carbono quemado en el oxígeno, y el bióxido de nitrógeno en el vapor de bisulfuro de carbono.

El experimento siguiente patentiza plenamente la influencia del aumento de presion en la potencia lumínica de los gases: El hábil químico citado ha hecho arder en oxígeno chorros de hidrógeno y de óxido de carbono, aumentando gradualmente la presion hasta 20 atmósferas. «A dos atmósferas, el poder luminoso, débil al principio, crece ostensiblemente; á diez, la luz emitida por un chorro de una pulgada de longitud es muy suficiente para que se pueda leer un periódico á dos piés de distancia de la llama, y sin que detrás de esta haya ningun reflector. Examinado el espectro de esta llama con el espectroscopio es brillante y perfectamente continuo desde el rojo hasta el morado.»

Aunque Frankland no niega en absoluto que la temperatura influya en el poder luminoso de la llama, cree que este poder resulta principalmente de la densidad de los cuerpos, que crece con el aumento de presion. «Puede decirse que los grados relativos de brillo luminoso son casi proporcionales á las densidades relativas de los diferentes productos de la combustion.»

Sainte-Claire Deville, participando hasta cierto punto de las opiniones del químico inglés, cuyos experimentos estima en alto grado interesantes, las interpreta de distinto modo. En su concepto, el principal efecto del aumento de presion debe ser el de elevar la temperatura de la combustion, y distingue las llamas en *brillantes* é *iluminadoras*. Una luz monocromática puede ser brillante, para lo cual basta sean de gran intensidad los rayos que de ella emanan. Una luz es iluminadora cuando posee el mayor número posible de rayos de varias

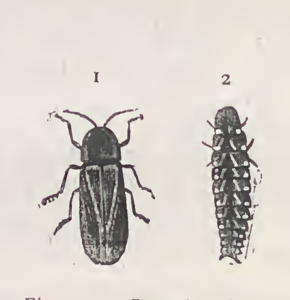



*Fig. 122.*—Lampiris ó gusano de luz: 1 insecto macho; 2 hembra



*Fig. 123.*—Piróforo noctiluco

refrangibilidades, como la luz del Sol, y cuando como esta, es lo más blanca posible. Por otra parte, los experimentos de Fizeau, Wolf y Diacon prueban que conforme se eleva la temperatura de una llama monocromática como la del sodio que es amarilla ó la del litio que es roja, el número de rayas brillantes de su espectro va creciendo. Estas dos luces se vuelven

blancas y acaban por contener rayas brillantes de todo género de refrangibilidad: si el metal arde á elevada temperatura, entónces se tornan iluminadoras.

En resúmen, segun Sainte-Claire Deville, el



*Fig. 124.*—Noctiluco miliar

brillo de una llama depende á la vez del número y disposicion de las rayas específicas que las sustancias en ella existentes puedan dar en el análisis espectral, de la temperatura á que se pongan estos elementos, y por último de su densidad.

## III

LUCES ARTIFICIALES DE GRAN INTENSIDAD. — LUZ DRUMMOND; LUZ DE MAGNESIO.—INTENSIDAD LUMINOSA DEL ARCO VOLTAICO.

Ninguna de cuantas luces se pueden producir artificialmente pueden competir en intensidad intrínseca—prescindiendo de la absoluta ó total que es indiscutible,—con la luz solar. Sin embargo, mediante los procedimientos ántes indicados se obtienen luces deslumbradoras.

Tal es la de Drummond, que resulta de la incandescencia de un cilindro de cal en la llama de una corriente de gas oxhídrico, es decir de una mezcla de gas oxígeno y de gas hidrógeno. En vez del cilindro de cal se puede poner un trozo de magnesia. Tan luégo como la llama de la corriente gaseosa ha caldeado una porcion suficiente del fragmento sólido, la luz es deslumbradora. Becquerel ha valuado la cantidad de luz producida por un aparato que consumia 3 ½ litros de gas por minuto, y la ha considerado equivalente á 20 mecheros Carcel, es decir, á 160 ó 180 bujías. Pues tan intensa luz, proyectada sobre el disco solar, parece una mancha negra.

La luz oxhídrica es rica en rayos amarillos y rojos; y contiene los azules y morados en menor proporcion que los focos de que vamos á hablar.

Un alambre de magnesio que arda en el aire ó en el oxígeno da una luz vivísima y de extraordinaria blancura, que contiene en abundancia los rayos más refrangibles, los más activos bajo el punto de vista químico. Así es que se han ideado lámparas que queman el magnesio de un modo continuo, á cuyo efecto hay en ellas un mecanismo de relojería que desarrolla el alambre á medida que se va consumiendo. Se emplea para sustituir en ciertos casos á la luz solar, especialmente para sacar fotografías en los subterráneos, en las cuevas y en las minas. Un alambre de magnesio de tres milímetros de diámetro que arda al aire libre tiene una potencia luminosa igual á 74 bujías; Bunsen ha averiguado que un decígramo de magnesio que arda en el oxígeno da una luz equivalente á la de 110 bujías, aunque la superficie incandescente del metal sea siete veces menor que la llama de una bujía. Por consiguiente, el brillo intrínseco de la luz del magnesio es por lo ménos 700 veces igual al de una bujía.

Finalmente, segun los experimentos de Becquerel, el arco voltaico producido por una pila de ácido nítrico de 100 pares da una luz cuya potencia lumínica equivale á la de 1000 bujías. Poniendo semejante foco de luz á un metro de una pantalla, la superficie de esta estaria unas 75 veces ménos alumbrada que por el Sol en el zénit, y unas 60 ménos que por el mismo astro á 30 grados sobre el horizonte. Pero se

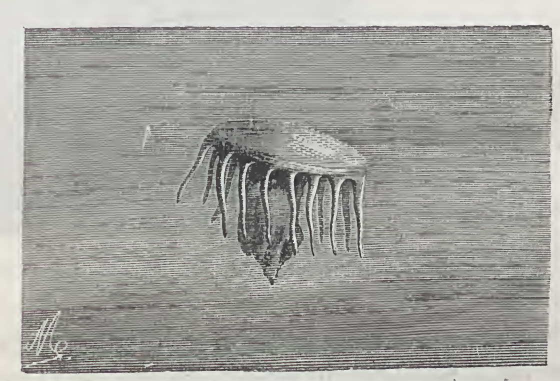


*Fig. 125.*—Medusa campanular

ha conseguido aumentar mucho esta intensidad luminosa, y tanto, que comparando Fizeau y Foucault el brillo del arco voltaico con la luz del Sol en un dia despejado del mes de abril, han visto que era solamente dos veces y media menor que la del astro radiante. La luz producida así era la del carbon positivo atravesado por la corriente de una pila formada por tres series de cuarenta y seis pares Bunsen.

## IV

### FOSFORESCENCIA

La incandescencia, es decir, la radiacion luminosa desarrollada por una temperatura muy alta, acompañada ó no de combinaciones químicas, no es el único modo de produccion de la luz. Los cuerpos pueden adquirir luminosidad y ser visibles en la oscuridad en ciertas circunstancias que vamos á estudiar ahora.

En 1677, un alquimista de Hamburgo llamado Brandt descubrió por un procedimiento que al principio guardó secreto (1), un nuevo cuerpo dotado, entre otras propiedades singulares, de la facultad de emitir, cuando se le pone al aire, una leve humareda que se renueva continuamente: este vapor es luminoso en la oscuridad, por cuya razon se aplicó el nombre de *fósforo* (de *fos*, luz, y *foros*, que lleva) á dicha sustancia, que es uno de los sesenta y seis cuerpos simples conocidos en la actualidad. Si se trazan con un cilindro de fósforo algunos signos en una pared, aparecen como rastros luminosos en la oscuridad, y no cesan de lucir hasta que ha desaparecido por completo la materia fosforada, ya sea por combustion lenta ó por evaporacion.

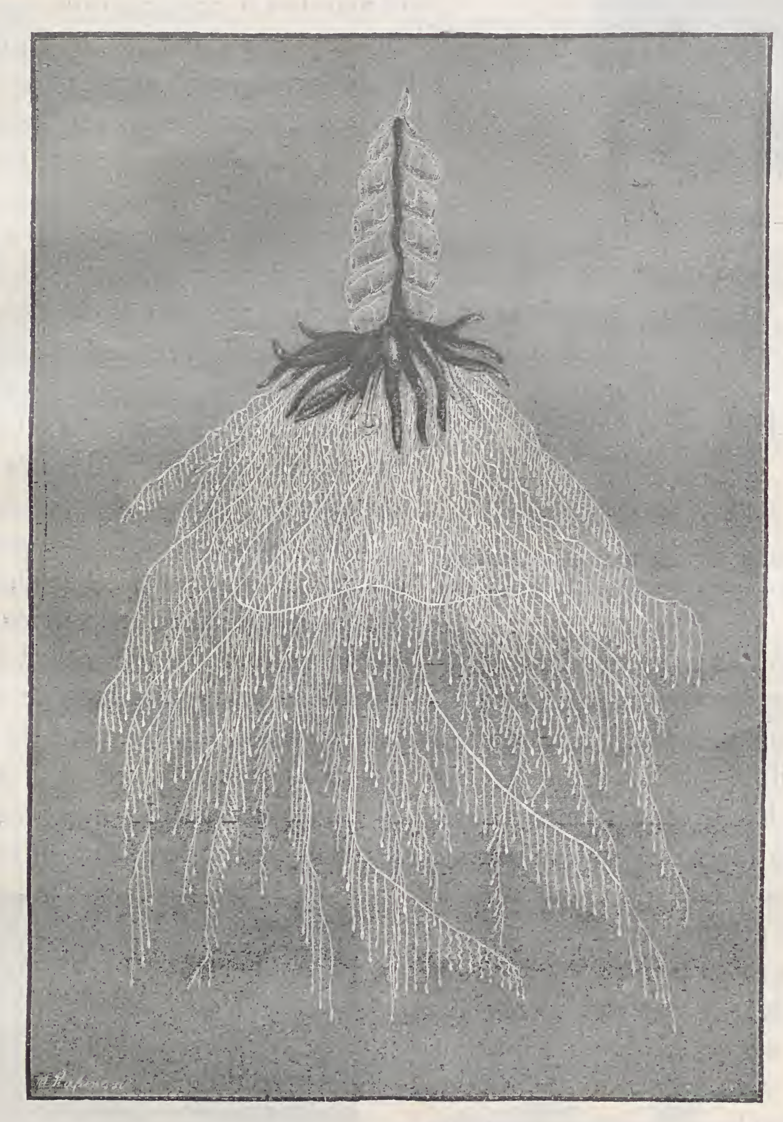


*Fig. 126.*—Fisoforo hidrostático

Mucho ántes que se descubriera este cuerpo, dábase el nombre de fósforos á todas las sustancias que, como esta, emiten luz sin color perceptible. Tales son las ramas que la humedad hace caer en descomposicion, los peces de mar muertos pero no putrefactos, cuyo fulgor se comunica al agua del mar cuando se los agita

(1) Pocos años despues que Bradnt, Kunckel halló el medio de obtener el fósforo. Un siglo despues, en 1769, Scheele demostró que los huesos del hombre y de los animales lo contienen en abundancia.

algun tiempo, y por último un gran número de sustancias minerales, cuando se las golpea ó frota ó se las expone á los rayos solares.

Los físicos dan el nombre de *fosforescencia* á esta emision de luz, espontánea ó artificial.

La fosforescencia no es peculiar de las materias inorgánicas ó privadas de vida. Cuando nos paseamos por el campo en una calurosa noche de junio ó julio, no es raro divisar sobre la yerba ó entre las malezas una porcion de lucecitas que brillan como otras tantas estrellas terrestres; son los lampiris ó *luciérnagas*, género de coleópteros, cuya larva goza, lo propio que el insecto perfecto, aunque en menor grado, de la propiedad de emitir un fulgor azulverdoso. Los *fulgores* de la Guayana y los *cucuyos* de México, Cuba y el Brasil brillan de noche con una luz bastante viva para que con su solo auxilio se pueda leer. Ciertas flores como la caléndula, la capuchina, la rosa de la India y otras se han considerado como fosforescentes; pero si hoy parece ya probado que se ha incurrido en un error respecto á ellas, no por eso es ménos cierto que unas quince plantas fanerógamas y ocho ó nueve criptógamas tienen la propiedad de emitir luz, pero solamente de noche y despues de un dia en que estos vegetales han recibido la luz del Sol; de suerte que la insolacion parece ser en ellos condicion esencial para su fosforescencia.

La fosforescencia del mar la producen millones de animalillos que como los lampiris y fulgores, emiten una luz bastante viva para dar á las olas la apariencia de masas inflamadas. Ora son infusorios, ora medusas ó asterias, etc. (1), los que difunden tan pronto un resplandor azulado como fulgores rojos ó verdes, ó comunican al agua del mar una tinta blanquecina que ha hecho que los marinos den á ciertos mares el nombre de *mar de nieve* ó *mar de leche*.

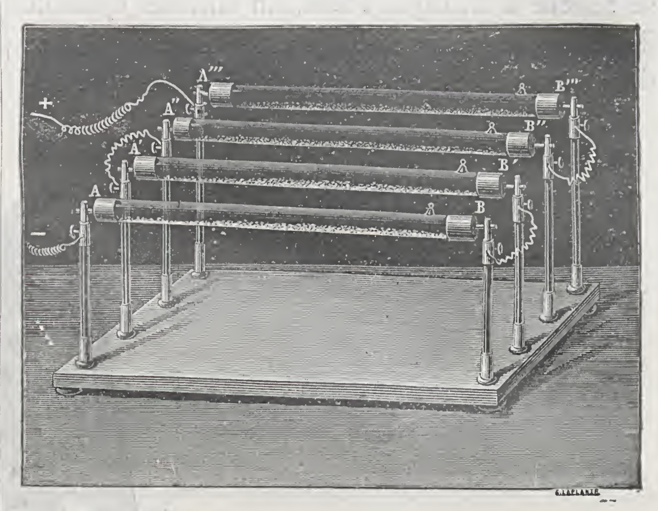



*Fig. 127.*—Experimentos de Becquerel sobre la fosforescencia producida por la luz eléctrica

Las conchas de ostras calcinadas se tornan luminosas cuando se las ha expuesto á la luz del Sol; debiendo al sulfuro de calcio esta propiedad, que tienen tambien los sulfuros de bario y de estroncio (2).

La fosforescencia se puede desarrollar tambien en un gran número de sustancias por medio de acciones mecánicas ó químicas. Una rueda de vidrio, frotada en el vacío con un tubo de la misma materia, despide un fulgor bastante intenso cuyo color es rojo de fuego: un trozo del mineral llamado *dolomita* da un rastro luminoso rojo si se le frota con un pedazo de paño. Lo propio acontece con ciertos diamantes. La cal fosfatada emite un resplandor amarillo por frotamiento. ¿Quién no ha notado al partir

(1) El *noctiluco miliar* es uno de los infusorios pelágicos que más contribuyen á la fosforescencia del mar. A primera vista parece una bolita de gelatina trasparente. Examinándolo con una lente, se distingue su forma esférica más ó ménos regular (fig. 124), un poco deprimida y ligeramente hinchada por debajo. El noctiluco tiene interiormente algunos gránulos, probablemente gérmenes y puntos luminosos, los cuales aparecen y desaparecen con rapidez: la menor agitacion excita su brillo. Estos puntos forman cuando más la vigésimaquinta ó trigésima parte del glóbulo. Los noctilucos tachonan la superficie del agua como pequeñas constelaciones caidas del firmamento.

Hoy sabemos que los infusorios no son los únicos animales productores de la fosforescencia, sino que tambien son causa de ese estado brillante del mar las medusas, asterias, moluscos, nereidas, crustáceos y hasta ciertos peces. Estos animales engendran luz como los torpedos engendran electricidad: multiplican y diversifican los efectos del fenómeno. La luz que producen pasa tan pronto al verde como al rojizo. En ciertos momentos se cree ver en el oscuro elemento discos radiantes, plumas estrelladas, franjas flameantes. Muchos animales parecen, vistos de léjos, masas metálicas enrojecidas hasta el blanco, ó ruedas de fuegos artificiales que despiden chispas. Hay festones de vasos de colores comparables á las guirnaldas de nuestras iluminaciones públicas, y meteoros incandescentes prolongados ó globulosos que se persiguen por las olas, suben, bajan, se alcanzan, se agrupan, se confunden, se separan, describen mil curvas caprichosas y se extinguen para encenderse otra vez y perseguirse de nuevo.» *(El mundo del mar, por A. Fredol.)*

Spallanzani ha reconocido que la propiedad singular que tienen las medusas de emitir luz reside en los tentáculos del animal, en la zona muscular del cuerpo y en la cavidad del estómago. Las demás partes del cuerpo no brillan sino por reverberacion.

(2) Canton, físico inglés, descubrió en 1764 la fosforescencia de las ostras calcinadas, y por esto se da algunas veces al sulfuro de calcio el nombre de *sulfuro de Canton*. A un obrero de Bolonia llamado V. Carciarolo, se debe el descubrimiento de la fosforescencia del sulfato de barita calcinado: de aquí el nombre de *fósforo de Bolonia* dado al sulfuro de bario.

azúcar los fulgores que aparecen en el momento del choque? Obtiénense efectos análogos frotando con fuerza dos pedazos de cuarzo, de creta, de cloruro de cal ó desprendiendo hojuelas de mica. Hé aquí, segun Becquerel quien se refiere á Enrique Rose, un curioso ejemplo de fosforescencia debida á un fenómeno químico de cristalizacion: «Si se toman 2 partes de ácido arsenioso vítreo, 45 de ácido clorhídrico y 15 de agua, y se hace hervir todo esto en una redoma por espacio de 12 á 15 minutos dejando luégo enfriar la disolucion todo el tiempo posible á cuyo efecto se disminuye gradualmente la llama del gas que sirve para calentar la redoma, al colocar esta en la oscuridad la cristalizacion va acompañada de una viva luz

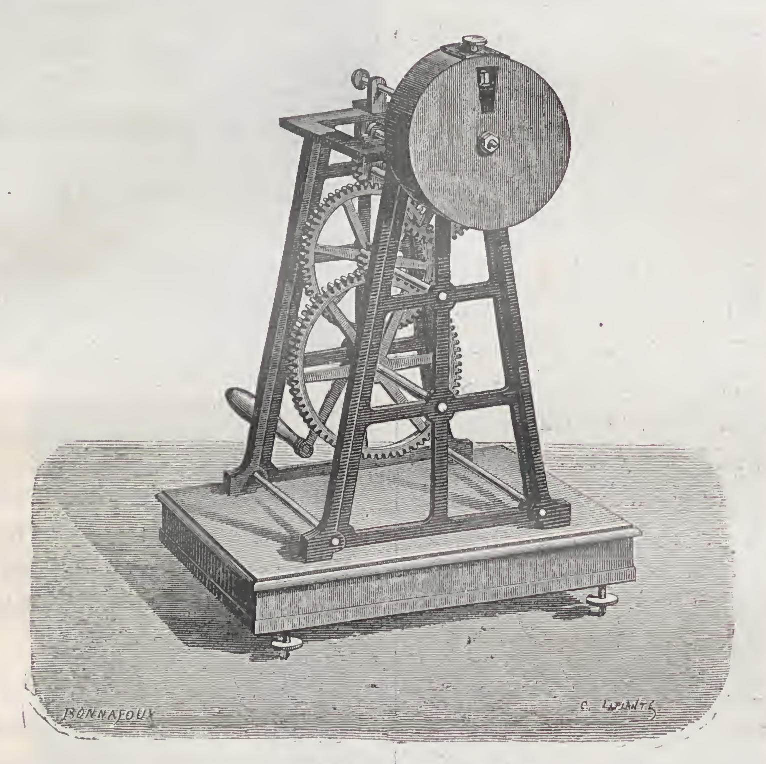



*Fig. 128.*—Fosforoscopio de E. Becquerel

y una chispa marca la formacion de cada cristal. Si se agita la vasija, fórmase de pronto un gran número de cristalitos, resultando al propio tiempo infinidad de chispas. Este fenómeno dura miéntras hay cristales por depositar, y áun á veces la disolucion enfriada sigue siendo luminosa al dia siguiente del experimento.» (*La Luz*, t. I.)

La accion del calor engendra tambien fosforescencia, y esto á una temperatura muy inferior á la incandescencia. El espato fluor, el diamante y otras piedras preciosas, la creta, los sulfatos de potasa y de quinina despiden luz cuando se los pone en contacto con cuerpos calientes. Citemos además entre los cuerpos que se vuelven fosforescentes por la accion del calor la hulla, la turba, la plombagina, el azabache, el azufre, el papel, los huesos, los dientes y el coral; y entre los líquidos, las esencias de trementina y de limon, el aceite de petróleo, cuando se los hierve. Más adelante veremos que la electricidad es susceptible de producir los mismos efectos en los cuerpos malos conductores.

Por último, muchas sustancias de orígen orgánico ó mineral se vuelven fosforescentes si se las expone algun tiempo á la accion de un foco de luz fuerte, por ejemplo, al de los rayos del sol. La intensidad, la duracion y el color del fulgor producido por la insolacion depende de la naturaleza de las sustancias á la vez que de su estado físico. Por lo que respecta á la influencia del foco que ocasiona la fosforescencia, no tan sólo varía con la intensidad de este foco, sino tambien con su composicion, es decir, cambia segun la mayor ó menor refrangibilidad de los rayos que emite. Así por ejemplo, la luz de una bujía puede bastar para hacer fosforescente el sulfuro de calcio; pero se requiere la solar para otros cuerpos; la luz eléctrica, tan

rica en rayos químicos, determina la fosforescencia en un período sumamente corto.

Jorge Pouchet cita un notable ejemplo de fosforescencia producida en grande escala por una insolacion prolongada. Hallábase en Egipto enfrente de una serie de colinas que habian estado reflejando todo el dia á la luz del sol un color blanco-amarillento deslumbrador; cuando el astro solar se puso, ocultándose casi perpendicularmente tras el horizonte, á cuyo ocaso siguió un breve crepúsculo, aquellas colinas, á pesar de no estar iluminadas ya por la luz solar, conservaron algun tiempo un brillo, un resplandor que no podia atribuirse á ninguna reflexion luminosa. ¿No es probable que por efecto de la accion continua de una insolacion interna que habia durado largas horas, las rocas de que dichas colinas estaban formadas se hubiesen vuelto luminosas por fosforescencia? Edmundo Becquerel ha reconocido, segun más adelante veremos, que ciertos cuerpos sometidos á la accion solar conservaban vestigios de fosforescencia muchas horas despues de su exposicion á la luz, persistencia de que están mucho más dotadas las sustancias en que se ha desarrollado la fosforescencia con poca intensidad.

Tenemos pues toda una serie de fenómenos en los cuales la produccion de la luz no es el resultado de una combustion viva á elevada temperatura, ni el de una iluminacion rápida que desaparece tan luégo como el foco deja de tener delante al objeto iluminado. Todos los cuerpos que acabamos de enumerar y que se hacen fosforescentes por causas particulares, adquieren, por tiempo limitado, es verdad, pero á veces bastante considerable, la propiedad de ser luminosos por sí mismos, de emitir luz perceptible en la oscuridad, y á veces bastante fuerte para iluminar los objetos vecinos.

Una vez descritos los hechos, veamos de indicar las condiciones que los determinan, ya que no de dar á conocer su causa.

## V

### LA FOSFORESCENCIA.—CONDICIONES Y CAUSAS DE LOS FENÓMENOS

La fosforescencia parece originada por muchas causas.

En los séres organizados y vivientes es casi desconocido el modo de produccion de la luz. Sólo se sabe que la voluntad del animal entra por algo en ella, que se requiere una temperatura moderada para que se desprenda luz, y tambien que haya oxígeno. Un frio demasiado vivo la hace desaparecer lo propio que un calor algo fuerte. La produccion de la luz en el fósforo, la madera podrida y los peces muertos tienen sin duda por causa una accion química, una combustion lenta; y en efecto en el vacío toda fosforescencia cesa. Finalmente, de los hechos anteriormente expuestos resulta que la insolacion, la elevacion de temperatura, la electricidad y las acciones mecánicas en que la electricidad y el calor desempeñan sin duda un papel, se hallan en muchos casos en condiciones favorables para el desarrollo de la fosforescencia. En estos últimos tiempos, este modo singular de producirse la luz ha sido objeto de estudios muy interesantes por parte de Biot, Matteucci, y principalmente de Edmundo Becquerel. Vamos á resumirlos rápidamente.

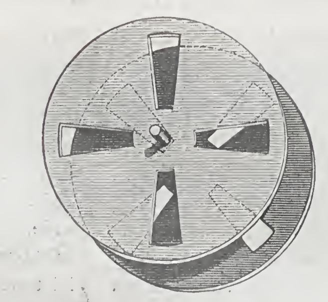


*Fig. 129.*—Discos del fosforoscopio

Este ha reconocido ante todo que la fosforescencia es una propiedad que pueden adquirir momentáneamente muchos cuerpos, sobre todo en el estado sólido y en el gaseoso; el papel, el ámbar, la seda y otra porcion de materias de orígen orgánico; los óxidos y las sales de los metales alcalinos, de los térreos y del uranio, y un gran número de gases. Pero ni en los otros metales ni en sus compuestos se ha notado hasta ahora el menor asomo de este fenómeno.

Las tintas del fulgor fosforescente varian segun la naturaleza del cuerpo; así es que las piedras preciosas despiden destellos azules ó amarillos. Los sulfuros de estroncio, bario y calcio dan todos los matices del espectro, desde el rojo hasta el morado. Pero hay una circunstancia singular, puesta en evidencia por Becquerel, y es que el tono y vivacidad del fulgor no

dependen solamente de la temperatura, sino tambien del modo de produccion de los sulfuros, y lo que es más raro todavía, del estado molecular de las sales de donde se les ha extraido. Así es que, habiendo tomado varios carbonatos de cal, de espato, de creta, etc., y habiéndolos tratado por el azufre, obtuvo seis sulfuros de calcio que, puestos al sol, se volvieron fosforescentes y presentaron en la oscuridad los matices siguientes:

| | | Matiz del fulgor. |
|---|---|---|
| Sulfuros de calcio procedentes de...... | Espato........... | Amarillo anaranjando. |
| | Creta............ | Amarillo. |
| | Cal de espato....... | Verde. |
| | Aragonita fibrosa.... | Verde. |
| | Mármol.......... | Violeta-rosado. |
| | Aragonita de Vertaison | Violeta-rosado. |

«Si me es permitida una comparacion, dice Becquerel con este motivo, añadiré que estos últimos cuerpos, con relacion á los efectos luminosos, son análogos á las cuerdas sonoras á las cuales se les hace producir diferentes sonidos segun su estado de tension.»

Hemos dicho ya que la elevacion de la temperatura acelera la fosforescencia, pero tambien la gasta más de prisa; el fulgor obtenido dura ménos tiempo. Asimismo tiene por efecto modificar las tintas; por ejemplo, el sulfuro de estroncio, que es azul á la temperatura ordinaria, pasa al morado-azul, al azul claro, al verde, al amarillo, y por fin al anaranjado, cuando se eleva progresivamente la temperatura desde 20 grados bajo cero á 150 sobre él.

Era sobremanera interesante estudiar cómo obran en los cuerpos las diferentes radiaciones del espectro para determinar su fosforescencia, desde los rayos químicos situados en la parte oscura del espectro más allá del morado hasta los caloríficos de la parte exterior al rojo. Para esto, se ha proyectado el espectro sobre tiras cubiertas de varias sustancias fosforescentes, y luégo se han examinado en la oscuridad los efectos luminosos producidos á distintas distancias, es decir en las regiones que determinan las rayas prismáticas. Háse visto tambien cuáles eran los rayos que producian los efectos luminosos más intensos, y conocídose que el maximum de accion depende de los cuerpos impresionados, pero en todos los casos, los rayos químicos más inmediatos al morado y por consiguiente los más refrangibles son los que producen la fosforescencia; los caloríficos no la excitan; bien que están dotados de la propiedad de continuar la accion de los rayos químicos.

Estos resultados explican perfectamente la escasa accion de la llama de las bujías ó del gas para producir la fosforescencia de los cuerpos, así como la eficacia de la luz eléctrica, la cuál abunda en rayos químicos ó ultra-morados; al paso que las primeras, ricas en rayos de color, son muy pobres en rayos químicos.

En la figura 127 se ve la disposicion adoptada por Becquerel para estudiar la accion de la luz eléctrica. Las diferentes materias fosforescentes están contenidas en una serie de tubos de Geissler dispuestos en el mismo circuito. Cuando la corriente del carrete de induccion pasa por los tubos, las sustancias que hay en ellos se iluminan, adquiriendo cada cual una coloracion especial, y siendo fácil comparar al mismo tiempo las duraciones relativas de coloracion respecto de cada una de ellas. La vivísima luz del magnesio compite, segun lo ha demostrado Le Roux, con la luz eléctrica. Basta encender un hilo de este metal en presencia de un tubo que contenga por ejemplo sulfuro de calcio, para obtener una fosforescencia continuada de esta sustancia, como se comprueba llevando el tubo á un lugar oscuro.

Becquerel ha ideado para estudiar estos fenómenos un instrumento llamado *fosforoscopio*, cuya descripcion es la siguiente: Dos discos pintados de negro llevan cuatro aberturas en forma de sectores y pueden girar alrededor de un eje comun; pero como las aberturas de uno de los discos no corresponden á las del otro, resulta que un rayo de luz no puede atravesar nunca el sistema de los dos discos, sea la que fuere la velocidad de rotacion. Ambos están encerrados en una caja pintada de negro, que permanece fija y en cuyas paredes se practican dos aberturas; la luz solar llega por una de ellas, da sobre el cuerpo cuya fosforescencia se quiere estudiar y que está fijo entre los dos discos en el eje de las ventanillas exteriores de la caja, pero como acabamos de decir, no puede pasar al otro lado. La luz fosforescente excitada en el cuerpo, pasa por el contrario á través de la abertura opuesta, siempre que el movimiento de rotacion coloca una de las ventanillas movibles enfrente de la abertura exterior.

La accion de la luz sobre el cuerpo se reproduce así hasta cuatro veces en cada vuelta si la velocidad es suficiente, la fosforescencia desarrollada es contínua, y la sensacion producida en el ojo del observador lo es tambien.

El fosforoscopio construido de este modo deja llegar al cuerpo que se observa una cantidad de luz fosforescente que llega al ojo; pero la duracion de la accion continua de la luz sobre el cuerpo varía con esta velocidad, puesto que es igual al tiempo que tarda una abertura en pasar por delante de él; se mide esta duracion, por lo demás, muy fácilmente cuando se conocen las dimensiones de la abertura y el número de vueltas que da en un segundo el sistema de los discos movibles. En resúmen, cuanto más rápida es la rotacion, más corta es la duracion de la accion del objeto luminoso, pero tambien son más cortas las interrupciones de este efecto, de modo que hay una velocidad determinada en la cual se obtiene el máximum de brillo.

Por medio del fosforoscopio, ha podido observar Becquerel, además de los resultados que dejamos indicados, emisiones luminosas en ciertos cuerpos, cuya duracion es en extremo débil, puesto que no pasa de la diezmilésima parte de un segundo. Otros, como los sulfuros verdes de estroncio y de calcio, continúan fosforescentes por espacio de treinta y seis horas. El diamante luce asimismo mucho tiempo. Por último, tambien pudo estudiar la ley que siguen los cuerpos fosforescentes al perder la luz por emisiones sucesivas.

Se ha sometido al análisis espectral la luz que emiten varios vegetales y animales fosforescentes, y se ha visto que los espectros de estas luces son continuos, no percibiéndose en en ellos rayas oscuras ni brillantes.

## VI

### FENÓMENOS DE FLUORESCENCIA

Si se coloca en el interior de una cámara oscura una cubeta de vidrio llena de una solucion de bisulfato de quinina, y se proyecta en una de las caras de la vasija un haz de luz solar, este haz atraviesa el líquido sin perder nada de su fuerza. La luz vista por trasmision continúa blanca, y la solucion de quinina parece enteramente incolora. Sin embargo, la cara anterior sobre la cual da el haz luminoso ha adquirido un bonito tono azulado que por difusion refleja en todos sentidos. A M. John Herschel se debe la primera observacion de este fenómeno, que se ha notado posteriormente en gran número de sustancias.

Por ejemplo, si se echa en la superficie de un vaso lleno de agua algunos fragmentos de

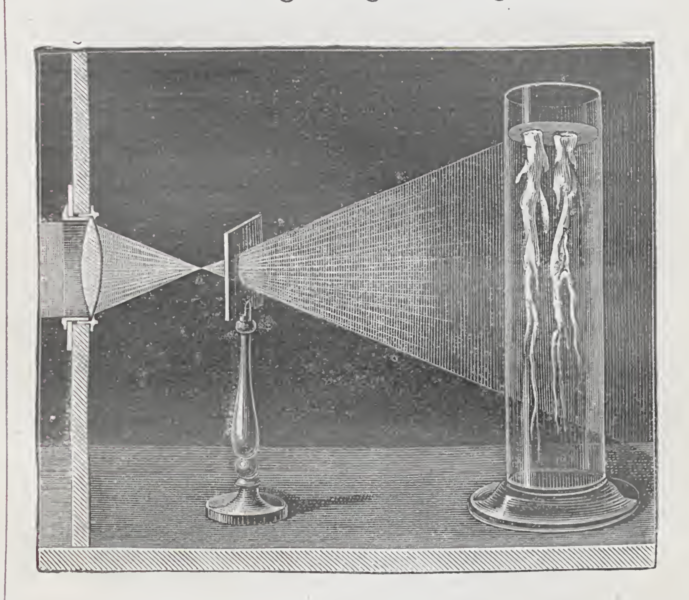


*Fig. 130.*—Fluorescencia de la esculina

corteza fresca de castaño de Indias, y se expone el vaso á la luz del Sol, no tardan en aparecer corrientes azuladas de un tono bastante vivo, que se desprenden de cada fragmento y van llenando poco á poco todo el líquido. El experimento es más notable cuando se le hace en la cámara oscura y se hace pasar el haz de luz por una lente adaptada á la abertura de la cámara, despues de haberla hecho atravesar una pantalla de cristal morado.

«La esculina que contiene la corteza, dice Becquerel, empieza á disolverse en el agua, y al punto se ven rastros azulados bastante luminosos, que revelan la presencia de esta materia, los cuales bajan verticalmente por el agua, cuyo tono general es más oscuro, y su color morado como el del haz de rayos incidentes. Si á los pocos momentos se agita el agua, la esculina se mezcla con todas las capas, y el vaso entero adquiere el color azul.»

Entre las sustancias líquidas que tienen tambien la propiedad de iluminarse en la superficie, citaremos las soluciones alcohólicas de clorofila, orchilla, girasol y estramonio. En el mismo caso se hallan ciertos cuerpos sólidos traspa-

rentes, como el cristal de urano y el espato fluor.

Al estudiar en este último cuerpo la fosforescencia especial á que nos referimos, el químico inglés Stokes dió al conjunto de estos fenómenos el nombre de *fluorescencia.*

El espato fluor se halla con frecuencia en los filones metalíferos, en forma de hermosos cristales cúbicos, unas veces regulares y otras de caras octaédricas. Expuestos estos cristales á los rayos solares en la cámara oscura, se coloran de una luz muy viva difundida en tenue capa por su superficie y cuyo matiz varia segun los ejemplares, siendo morado, azulado, azul-verdoso ó sonrosado (1).

Ya dejamos dicho que J. Herschel habia reconocido que la luz que penetra en la solucion de sulfato de quinina no pierde de su fuerza, y que esta solucion continuaba trasparente é incolora. Pero tambien notó una circunstancia muy importante, que es general en los fenómenos de fluorescencia. Habiendo puesto dos cubetas del mismo líquido fluorescente una junto á otra, vió que el haz luminoso, despues de su paso por el primer medio, habia perdido la facultad de suscitar la fluorescencia

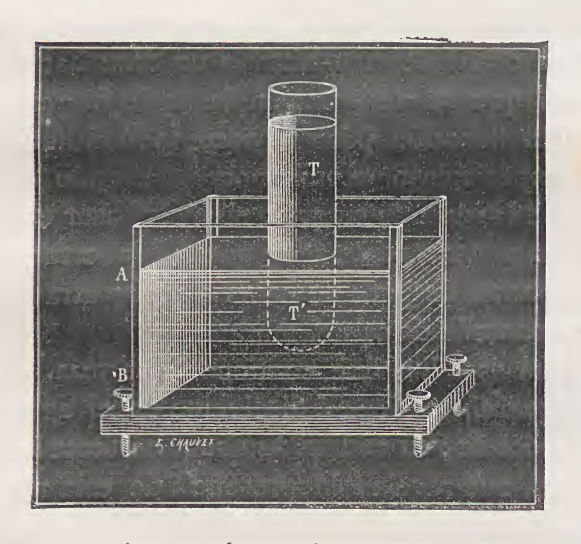



*Fig. 131.*—Experimento en demostracion de que el poder de producir la fluorescencia es limitado

en el líquido de la segunda cubeta. Hácese patente esta curiosa propiedad del modo siguiente: Un tubo TT' (fig. 131) lleno de la solucion de quinina se hace luminoso á lo largo de la cara ó arista expuesta á los rayos solares. Se le introduce en la cubeta llena del mismo líquido, y al punto toda la parte sumergida del tubo pierde su luz al paso que la cara AB de la cubeta situada delante se ilumina á su vez. El propio fenómeno se observaria con dos cristales de fluorina puestos uno junto á otro.

En las cátedras de física se hace un curioso experimento que consiste en trazar un dibujo cualquiera en una hoja de papel con un pincel empapado de sulfato de quinina. Este dibujo apénas se ve cuando se le expone á la luz blanca; pero si entre el haz luminoso y el papel se interpone un cristal de color morado oscuro, todas las partes de la hoja á las que no ha tocado el sulfato de quinina permanecen oscuras, miéntras que las líneas del dibujo despiden un hermoso brillo azulado. El efecto es todavía más sorprendente si se opera con luz eléctrica.

¿Qué interpretacion se debe dar á estos fenómenos?

Ante todo, hagamos observar que no hay absorcion sensible de luz, puesto que el haz incidente conserva, cuando emerge de las sustancias fluorescentes, la intensidad y el color que ántes tenia. Como no tenia efecto la absorcion sobre las radiaciones luminosas, tratábase de averiguar si el fenómeno procedia de la absorcion de las radiaciones químicas, y así lo ha demostrado en efecto el análisis espectral.

Por otra parte, la luz fluorescente analizada con el prisma ha dado, en la mayoría de las sustancias, espectros constituidos del mismo modo que los de la luz del haz incidente. Así, la luz difundida por el bisulfato de quinina, por la fluorina ó la esculina se compone de todas las radiaciones desde el rojo hasta el morado. Sin embargo, el cristal de urano y la clorofila dan espectros formados de rayas brillantes separados por bandas oscuras.

Pero hay una ley general demostrada por los experimentos de Stokes, y es la siguiente: los rayos que, por su accion sobre las sustancias fluorescentes, dan motivo á la produccion de la luz, tienen mayor refrangibilidad que los de esta luz especial. Por lo comun, las radiaciones químicas son las absorbidas por la sustancia fluorescente, y trasformadas luégo en radiaciones luminosas.

(1) El espato fluor, que ha dado su nombre á los fenómenos de fluorescencia, se vuelve tambien luminoso por el calor. Reduciéndolo á polvo y echando este polvillo blanco en una placa de hierro caldeada al rojo naciente, despide una luz que pasa del rosa al morado y al blanco.

## VII

### TRASFÒRMACION DE LAS RADIACIONES.—CALORESCENCIA

De los hechos que acabamos de describir en los artículos anteriores resulta que en ciertos cuerpos puede producirse luz sin que lleguen á la temperatura necesaria para la incandescencia, y sin que intervengan los fenómenos químicos que acompañan á la combustion. El carácter comun de la fosforescencia y de la fluorescencia consiste en que tanto uno como otro fenómeno tienen por causa la trasformacion de algunas de las radiaciones de un foco. Una parte de la fuerza viva de las ondas emanadas queda absorbida, dando orígen á una radiacion nueva compuesta de vibraciones ménos rápidas, cuya longitud de onda es mayor; en una palabra, á causa de esta trasformacion se hacen visibles otras radiaciones que por lo comun no lo son y que pertenecen á la parte química del espectro.

¿Puede ocurrir lo contrario, esto es, la trasformacion de radiaciones ménos refrangibles en otras que lo sean más? Cuestion es esta ya planteada y que el físico inglés Tyndall ha resuelto del modo siguiente. Con tal objeto se ha valido de la propiedad que tiene una solucion concentrada de iodo en el sulfuro de carbono de absorber casi completamente los rayos luminosos y de trasmitir, por el contrario, casi completamente tambien los rayos de la parte infraroja del espectro.

Llenando de esta solucion una redoma, se ve fácilmente que el color morado oscuro de la masa líquida intercepta la luz hasta el punto de no percibirse en él ningun indicio luminoso, al paso que poniendo en el foco de esta especie de lente yesca, papel ó pólvora, los rayos caloríficos oscuros así concentrados producen su incandescencia (fig. 132).

Tyndall adoptaba como foco radiante el arco voltaico producido entre los conos de carbon de un regulador foto-eléctrico. Estos carbones estaban colocados en el interior de una cámara estañada, en coincidencia con el foco de un espejo cóncavo que enviaba el haz luminoso á una redoma llena de la solucion iodada de sulfuro de carbono. Empleando una redoma de 17 centímetros de diámetro, ha visto inflamarse un pedazo de papel negro en el foco de aquella y caldearse una placa de platino hasta el rojo; con otra redoma de 8 centímetros la placa se calentó al rojo claro, y al blanco con otra más pequeña.

Describamos, tomándolos del mismo Tyndall, los efectos producidos en el foco conjugado

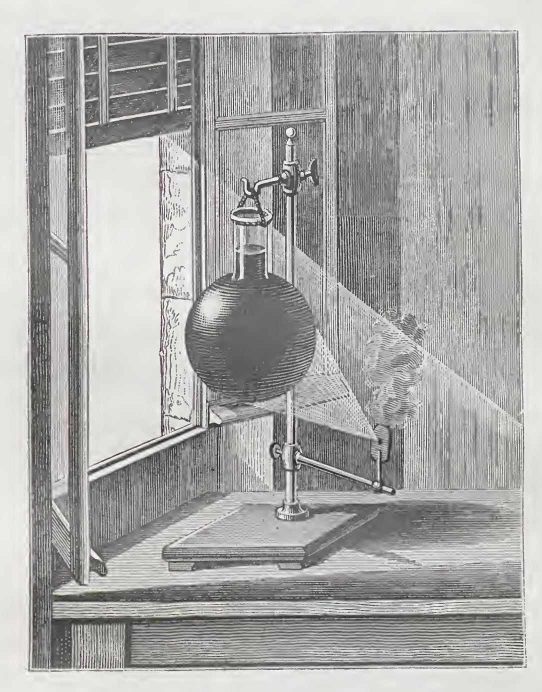


*Fig. 132.*—Separacion de las radiaciones luminosas y caloríficas por el sulfuro de carbono iodado

del espejo, cuando el haz convergente de luz eléctrica atraviesa una vasija que, en un espesor de 6 centímetros, contenga la solucion de iodo:

«El calor del foco, dice, es sumamente fuerte; pueden fundirse en él placas de plomo y de estaño dadas de negro de humo; y se ha agujereado y derretido en poco tiempo un pedazo grueso de metal fusible. Una lámina de zinc ennegrecida y puesta en el foco, se inflama, y haciéndola pasar lentamente á través del foco, se la puede mantener en estado de ignicion hasta que se consuma enteramente. Un alambre de magnesio, aplanado en su extremo y ennegrecido, se inflama tambien y arde con mucho resplandor. Es fácil encender instantáneamente un cigarro en el foco oscuro.»

Sin embargo, Tyndall observa que en varios casos «los cuerpos expuestos á los rayos invisibles eran más ó ménos combustibles. Su intenso brillo, debido en gran parte á la combustion, á la accion del oxígeno de la atmósfera, no probaba de un modo concluyente que hubiese aumentado la refrangibilidad de los rayos.»

Para hacer patente este aumento, practicó experimentos análogos en cuerpos no combustibles, ó en otros que lo eran, pero situados en un espacio privado de hidrógeno. «No he dejado de elevar, dice, al calor blanco láminas de platino platinado, ya al aire libre, ya en el vacío.

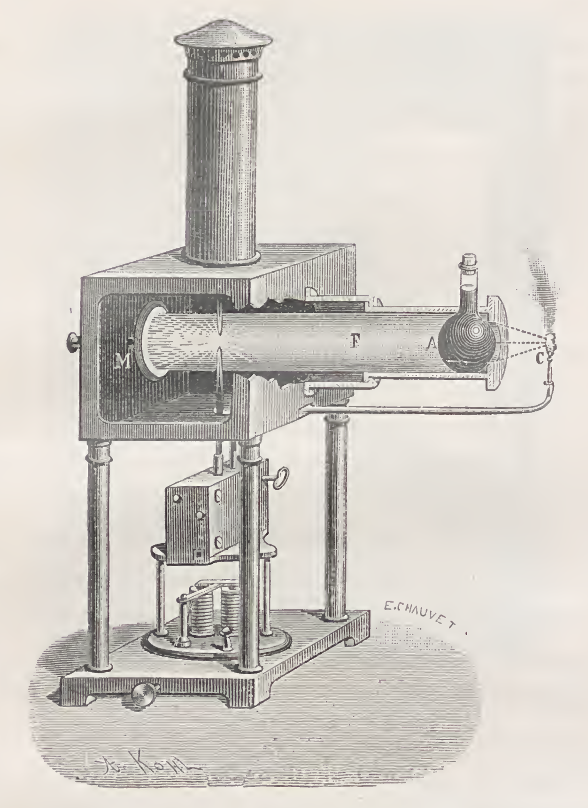


*Fig. 133.*—Experimento de Tyndall. Fenómeno de calorescencia

El platino caldeado al blanco, visto al través de un prisma de sulfuro de carbono, da un espectro rico y completo. Todos los colores, desde el rojo hasta el morado, brillan con extraordinario fulgor. Las ondas de donde provenian primitivamente estos colores no tenian rayos visibles, ni rayos ultra-morados mezclados con ellos; eran exclusivamente ultra-rojos. La accion de los átomos de platino los hace pasar del estado de rayos de calor al de rayos de luz. Los rayos caen sobre el platino vibrando de cierto modo, y se separan de él vibrando más rápidamente; con lo cual ha aumentado su refrangibilidad, y de invisibles que eran se han hecho visibles. Para expresar esta trasformacion de los rayos caloríficos en otros de mayor grado de refrangibilidad, propongo la palabra *calorescencia,* que armoniza perfectamente con la de *fluorescencia* introducida por el profesor Stokes, é indica la naturaleza de los efectos á que se aplica.»

## VIII

### DESCOMPOSICION DE LA LUZ POR ABSORCION

Hemos visto que los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos, considerados como medios con respecto á la luz, se dividen en *opacos* y *trasparentes* ó *diáfanos.* Los primeros no se dejan atravesar por la luz que, al llegar á su superficie, se refleja ó difunde, es decir, vuelve al medio de donde ha partido; los segundos, por el contrario, trasmiten la luz que penetra en mayor ó menor cantidad en el interior del nuevo medio.

¿Hay cuerpos dotados de opacidad absoluta? ¿Los hay de transparencia absoluta? No. Si los metales, por ejemplo, interceptan completamente la luz, consiste en que siempre se les emplea de cierto espesor. Un experimento ya antiguo (hecho por Newton) prueba que el metal más denso despues del platino, el oro, da paso á cierta cantidad de luz, para lo cual basta reducirlo á hojas sumamente delgadas. Pegando á una placa de cristal una hoja de oro de las que fabrican los batidores, y mirando á través de ella la luz de una bujía ó la del cielo, se percibe un resplandor azul-verdoso muy marcado. Esta coloracion de la luz trasmitida demuestra que no procede de una hendidura ó raja que hubiera en la hoja de metal, sino que ha atravesado realmente la sustancia misma del oro. La plata, reducida tambien á hojas sumamente delgadas, da paso á una luz verde. Lo propio sucede con otras muchas materias, que parecen opacas y lo son en efecto cuando tienen cierto espesor, pero que adquieren diafanidad ó trasparencia tan luégo como se las reduce á placas delgadísimas. En este caso se encuentran muchos de los pequeños objetos que se examinan en el porta-objetos del microscopio; su extraordinaria tenuidad los hace visibles por trasparencia; tales son los infusorios, las células vegetales y varias sustancias minerales.

Así tambien, los medios que parecen dotados de la mayor trasparencia absorben en realidad una parte de la luz que los penetra. El agua más pura parece absolutamente límpida en corta cantidad ó cuando forma una delgada capa; los objetos conservan á través de ella su brillo y

parecen tan luminosos y distintos como si la capa líquida no existiera, propiedad que se nota mucho más en el aire. Sin embargo, tan luégo como el agua más límpida y más pura tiene cierta profundidad, su trasparencia disminuye, y en breve se advierte en alto grado la absorcion de la luz; por una parte, los objetos vistos á través del agua son cada vez ménos distintos hasta hacerse invisibles; por otra, adquieren una coloracion que es la del agua misma vista por difusion. En cuanto á la luz trasmitida, aparte de la disminucion de intensidad que sufre á su paso por el líquido, ha adquirido un color que es generalmente diferente del que presenta en la reflexion.

Así, las radiaciones luminosas, al atravesar los medios dotados de una trasparencia relativa, se extinguen ó quedan en parte absorbidos. ¿En qué consiste esta absorcion, y cómo varía segun la naturaleza de las sustancias, su espesor, etc.?

Consistiendo la luz en un movimiento ondulatorio, en una mezcla de cierto número de vibraciones que difieren por sus períodos, como lo prueba la diferencia de refrangibilidad de sus diversos rayos, el movimiento que la constituye no puede ser destruido; es una consecuencia de lo que se llama en mecánica el *principio de la conservacion de las fuerzas vivas* (1). Como este movimiento no queda anulado, naturalmente ha de trasformarse. En los artículos que preceden hemos descrito varios modos de esta trasformacion. Hemos visto que ciertas radiaciones se convierten en calor, es decir, en vibraciones ménos rápidas; otras sustancias tienen la propiedad de trasformar algunas radiaciones luminosas ó químicas en otras radiaciones ménos refrangibles, aunque visibles siempre, y correspondiendo á estos cambios los fenómenos de fosforescencia y de fluorescencia. Describamos algunos de los fenómenos que caracterizan la absorcion de la luz por diferentes medios.

Un medio es incoloro cuando deja pasar todos los rayos coloreados del espectro desde A hasta H, ó por lo ménos cuando los debilita á todos en la misma proporcion. En este caso se hallan el vidrio, la sal gema, el agua y el aire, por lo ménos cuando son muy densos, pues siendo entónces perceptible la absorcion desigual de ciertas radiaciones, los medios adquieren el color que resulta de la trasmision de las radiaciones no absorbidas. Más adelante trataremos de esa coloracion por lo que respecta al agua y al aire. En cuanto á la sal gema, presenta la particularidad de que tambien da paso á los rayos de la parte oscura del espectro y á los de la parte química.

Es de notar que los cuerpos *negros*, que extinguen los rayos luminosos de todos colores, absorben tambien los ultra-morados, miéntras que dejan pasar las radiaciones caloríficas oscuras; la sal gema, el alumbre y el cuarzo ahumados se hallan en este caso. Hemos visto que la solucion de iodo en el sulfuro de carbono, que es roja cuando forma una delgada capa, extingue casi completamente la luz solar si tiene uno ó dos decímetros de espesor; pero continúa siendo trasparente para las radiaciones de calor.

Entre los medios diáfanos é incoloros y los cuerpos negros que interceptan la luz, se colocan los cuerpos trasparentes coloreados que absorben con desigualdad los diversos rayos del espectro y cuya coloracion varía á veces totalmente segun el espesor, y otras veces segun la temperatura.

Merced al estudio de los espectros de la luz que ha atravesado tales medios se puede medir la absorcion de varias radiaciones y averiguar en virtud de qué concurso de rayos adquiere el medio la tinta que le caracteriza. Para observar la influencia del espesor se da á la materia coloreada la forma de un prisma de ángulo agudo, de modo que el grueso vaya variando progresivamente del vértice á la base. Y no tan sólo sucede que el color de las sustancias se oscurece conforme aumenta el espesor, sino tambien que algunas cambian así completamente de color,

(1) Citemos lo que dice Fresnel acerca de este punto: «Los cuerpos negros y áun las superficies metálicas ménos brillantes, no reflejan, ni con mucho, la totalidad de la luz que cae sobre su superficie; los cuerpos imperfectamente trasparentes, y hasta los más diáfanos cuando son bastante gruesos, absorben tambien (para valerme de la expresion usada) una cantidad notable de luz incidente; pero de esto no debe deducirse que el principio de la conservacion de las fuerzas vivas no sea aplicable á estos fenómenos: al contrario; de la idea más probable que pueda formarse acerca de la constitucion mecánica de los cuerpos resulta que la suma de las fuerzas vivas debe ser siempre la misma (miéntras no cambien de intensidad las fuerzas aceleradoras que tienden á colocar de nuevo á las moléculas en su posicion de equilibrio), y que la cantidad de fuerzas vivas que desaparece como luz se reproduce como calor.»

fenómeno conocido con el nombre de *dicroismo* ó *policroismo*. El ilustrado inglés M. Gladstone ha estudiado de una manera muy ingeniosa la influencia del espesor en el color de los medios, así como los espectros de absorcion que explican, por la sola inspeccion de su forma, los cambios de color que de ella resultan. Hé aquí, segun G. Salet, cómo ha procedido M. Gladstone con las sales de colores, como el cloruro de cromo, el permanganato de potasa y el cloruro de cobalto.

«Llena un prisma hueco de cristal de la solucion que se propone examinar, y luégo mira á través de un prisma de vidrio una ranura muy estrecha y luminosa situada detrás del prisma hueco y perpendicularmente á sus aristas principales. Gracias á esta disposicion, los rayos trasmitidos por los diferentes puntos de la ranura han de atravesar espesores crecientes de líquido, desde uno insignificante hasta el que basta para interceptar casi toda luz.»

El estudio de los espectros de absorcion es tambien interesante para los químicos, por cuanto dichos espectros caracterizan casi siempre la sustancia estudiada. Tomemos como ejemplo la materia colorante de la sangre. «Cuando se mezcla, dice M. Buignet en sus *Manipulaciones de física*, una ó dos gotas de este líquido con cuatro ó cinco gramos de agua, y despues de introducir la mezcla en una pequeña cubeta de vidrio de caras paralelas, se coloca esta cubeta delante de los colimadores del espectroscopio, se notan en el espectro producido dos anchas fajas oscuras, cuya posicion es constante é invariable. Ambas están situadas entre las rayas D y E; pero una en el amarillo y otra en el verde..... Esta propiedad de dar dos fajas ó bandas de absorcion situadas como acabamos de decir, pertenece á la *hemoglobina* ó glóbulo sanguíneo combinado con oxígeno. Segun Hope Seyler, un líquido que no contenga más que 0,0001 de hemoglobina, examinado á un espesor de $0^{m}01$, sigue presentando distintamente las dos bandas.»

«Basándose únicamente en el procedimiento espectroscópico, pudiera temerse, añade M. Buignet, el confundir la hemoglobina de la sangre con ciertas sustancias colorantes rojas ó violadas; pero la experiencia demuestra que no es así. El *jugo de cerezas*, los infusos de *mirtilo*, *palo Brasil*, *rubia*, *vino tinto*, y los colores de *anilina*, los *hiposulfitos*, *meconatos* y *sulfocianuros férricos*, producen muchos cambios en el aspecto del espectro; pero nunca bandas de absorcion que puedan confundirse con las de la sangre. Verdad es que la *cochinilla* en solucion amoniacal da dos bandas que examinadas superficialmente podria confundírselas con las de la sangre; pero la posicion de estas bandas no es la misma, y el sulfuro de amonio no hace aparecer la banda de Stokes. Por consiguiente, se puede presumir con fundamento que se trata de una mancha de sangre, siempre que el líquido observado con el espectroscopio forme dos bandas de absorcion comprendidas entre las rayas D y E, y que estas bandas desaparezcan bajo la accion del sulfuro de amonio para ceder el puesto á una sola situada en el espacio claro que aquellas dejaban entre sí. No puede desconocerse la importancia que estos casos presentan para la comprobacion de las manchas de sangre en química legal.»

Volvamos á los fenómenos de coloracion debidos á la absorcion desigual de los rayos coloreados de la luz blanca cuando ésta atraviesa ciertos medios.

Tomemos un cristal encarnado, cuyo color se debe al protóxido de cobre. Si se examina el espectro de la luz que atraviesa una lámina de este cristal, vese que se reduce á la parte roja; las fajas oscuras que ocupan otras partes del espectro indican los colores que han sido más absorbidos. En un cristal purpúreo, predominan las partes roja y morada; el verde y los colores inmediatos son los más absorbidos. El color de las sales de nickel y de los cristales verdes se debe á la absorcion de los colores extremos del espectro, en el rojo y el morado; con un espesor creciente, el verde predomina cada vez más y acaba por quedarse solo.

Como ejemplos de dicroismo procedentes de la variacion de las partes del espectro absorbidas conforme va variando el espesor, citaremos el vino añejo, el aguardiente, la infusion de azafran, el cristal amarillo, etc., que son amarillos cuando el espesor es poco y cuyo matiz pasa al rojo y al pardo-rojo, á medida que la luz atraviesa espesores crecientes de estos medios. Las sales de cromo y de manganeso dan paso á dos clases de rayos y sus espectros tienen

dos máxima, una en el rojo y otra en el verde; cuando el espesor aumenta, el rojo predomina y el color se torna lívido y rojizo. El azul cobalto ó el cristal azul que, á poco espesor, presenta el color á que debe su nombre, se vuelve cada vez más rojo á medida que este espesor aumenta.

El doctor Brewster ha hecho interesantes experimentos relativos á la influencia del calor en la fuerza de absorcion de los medios coloreados, y ha reconocido que esta influencia obra de distinto modo segun las sustancias, disminuyendo la absorcion en las unas y aumentándola en las otras. «Habiendo calentado al rojo, dice, un cristal purpúreo que absorbia la mayor parte del verde, del amarillo y del rojo interior ó el más refrangible, le expuse á un calor muy fuerte; cuando su calor rojo hubo pasado, observé que la trasparencia del cristal habia aumentado y que trasmitia libremente el rojo interior, el verde y el amarillo, absorbidos ántes en gran parte por él. Sin embargo, este efecto desapareció gradualmente, y cuando el cristal se enfrió del todo, recobró su primera fuerza de absorcion. En cambio, si se calentaba del mismo modo un pedazo de cristal verde-amarillento, perdia casi enteramente su trasparencia. Al recobrar su color primitivo, pasaba por varios matices verde-aceitunados; pero, despues de enfriado, era ménos verde que ántes del experimento. Sometiendo el rubí balaja á altas temperaturas, observé que su color rojo se trasformaba en verde, el cual se convertia á su vez en pardo á medida que el rubí se enfriaba, hasta que hubo adquirido de nuevo su color primitivo.»

# CAPITULO XII

## ¿QUE ES LA LUZ?

### I

### ANTIGUAS HIPÓTESIS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Hasta aquí nos hemos limitado á describir los fenómenos luminosos y algunas de sus leyes, sin hacer intervenir en la explicacion de los hechos ninguna hipótesis sobre la naturaleza de la luz. Sin embargo, desde el principio hemos apuntado que la luz consiste, como el sonido, en vibraciones rapidísimas de las moléculas de los focos, vibraciones que se comunican á un medio especial y se propagan en él con extraordinaria velocidad en forma de ondulaciones. Ha llegado el momento de explicar más completamente la teoría, sin la cual los fenómenos que aún tenemos que describir parecerian las más de las veces inexplicables.

Empecemos por resumir sucintamente las antiguas hipótesis sobre la luz, hipótesis hoy generalmente desechadas.

Acerca de este asunto tenian los antiguos, lo mismo que sobre los demás fenómenos físicos, las ideas más erróneas ó las nociones más vagas. ¿Qué diremos del modo cómo la escuela pitagórica explicaba la luz, ó mejor dicho, la vision? Segun los filósofos de esta escuela, «el ojo proyecta fuera de sí una infinidad de rayos que, cual otros tantos brazos invisibles, van á pulsar y examinar los objetos percibidos, resultando de aquí la imágen visual de esos objetos. Demócrito y los epicúreos formularon una teoría enteramente opuesta, que acabó por predominar. Segun ella, las imágenes que se forman en el ojo son una emanacion de los objetos. Platon trató de conciliar ambas teorías, explicando la vision por el encuentro de los rayos que partian del ojo con los que emanaban del objeto. ¿En qué consistia esta doble emanacion, y cómo podia resultar la sensacion de la luz del encuentro de rayos que chocaban fuera del ojo? Difícil es darse cuenta de la idea que habia sugerido ambas hipótesis.

No es ménos singular la opinion de Aristóteles: este gran filósofo «explicaba la naturaleza de la luz suponiendo que hay cuerpos trasparentes por sí mismos, como el aire, el agua, el hielo etc., es decir cuerpos que tienen la

propiedad de hacer visibles á los que están detrás de ellos; pero como de noche no vemos nada á través de estos cuerpos, añade que no son trasparentes sino potencialmente, y que de dia lo vuelven á ser real y actualmente, y por cuanto sólo la presencia de la luz puede reducir esta potencia á hechos, define la luz diciendo que es *el acto del cuerpo trasparente considerado como tal.* Añade que la luz no es fuego ni ninguna otra cosa corpórea que irradie del cuerpo luminoso, y que se trasmite á través del fuego, ó de algun otro cuerpo luminoso, al cuerpo trasparente.» *(Enciclopedia.)*

Hay que llegar á los tiempos modernos, en que se ha inaugurado el método de observacion experimental, para encontrar en lo que se refiere á la cuestion planteada al principio de este capítulo otra cosa que miras puramente especulativas, es decir, para encontrar hipótesis verdaderamente científicas. No enumeraremos todas las que se han propuesto, pues á decir verdad se reducen más ó menos á dos teorías principales, las de la *emision* y la de las *ondulaciones*. Empecemos por la exposicion de la primera, llamada tambien *teoría de la emanacion.*

## II

### TEORIA DE LA EMISION

Segun Newton, que fué el primero que redujo á sistema la teoría de la emision, la luz se forma de moléculas materiales de extraordinaria tenuidad, emitidas á cada momento por los focos luminosos y proyectadas por estos al espacio con velocidad uniforme, siendo el choque de estas moléculas en la retina el que, impresionando los nervios ópticos, produce la sensacion de la luz. Cuando el movimiento de estas partículas las lleva cerca de las moléculas de los cuerpos, quedan sometidas á la accion de fuerzas, ora atractivas, ora repulsivas, produciendo las primeras la refraccion y la reflexion interior, las segundas la reflexion exterior. Hay tantas especies de partículas como de colores, y cada especie está dotada de una refrangibilidad especial.

El conjunto de las partículas sucesivas que siguen la misma línea recta forma lo que se llama un rayo luminoso; pero estas partículas pueden estar separadas por grandes intervalos. En efecto, la impresion en la retina dura cosa de $^1/_{10}$ de segundo; bastaria, pues, que diez partículas luminosas penetrasen en un segundo en nuestro ojo, para que la impresion causada por una de ellas no se borrase ántes de la llegada de la segunda, ó lo que es lo mismo para que hubiese sensacion contínua; y suponiéndolas espaciadas por igual se seguirian á 29,800 kilómetros ó á 7,450 leguas de distancia unas de otras. Suponiendo que se suceden en número de 100 por segundo, habria de todos modos 2,980 kilómetros de intervalo de una á otra.

Dada tal hipótesis, se comprende que los rayos luminosos emanados de varios focos puedan cruzarse en todas direcciones sin estorbarse mutuamente. Pero es preciso suponer á la masa de cada uno de dichos focos un valor tan pequeño que apénas puede concebirlo la imaginacion. J. Herschel hace con este motivo la comparacion siguiente: «Si una molécula de luz pesara un solo grano ($0^{gr},065$), su efecto seria igual al de una bala de cañon de más de 150 libras (56 kilog.) animada de una velocidad de 305 metros por segundo. ¡Cuál no debe ser pues esa tenuidad, si los millones de millones de moléculas que penetran en las lentes ó espejos jamás han podido comunicar el menor movimiento á los aparatos más delicados construidos exprofeso para estos experimentos!» *(Tratado de la Luz*, tomo I.)

Acabamos de decir que Newton suponia, para explicar los fenómenos de la refraccion y reflexion de la luz, que cada molécula es rechazada ó atraida por las moléculas de los cuerpos. La intensidad de estas fuerzas, que se ejercen en esferas infinitamente pequeñas, es prodigiosa: se ha calculado que exceden á la intensidad de la gravedad en la superficie de la Tierra hasta el punto de que para expresar su valor en números seria preciso multiplicar esta última intensidad por la cifra 2 seguida de 44 ceros.

Habiendo considerado Newton la luz como si estuviera formada de partículas sumamente ténues, lanzadas al espacio con enorme velocidad, podria creerse que explicaba los fenómenos de la reflexion asimilándolos á lo que se observa cuando un cuerpo elástico choca con la superficie de un plano duro y bruñido; porque

en este caso el cuerpo es despedido, como el rayo luminoso, formando con el plano un ángulo de reflexion igual al de incidencia. Para los partidarios del sistema de la emision no sucede esto así; las moléculas luminosas no llegan á ponerse en contacto con los cuerpos que las reflejan (1). Segun ellos, á partir de la superficie de incidencia se ejerce una fuerza repulsiva, que tiende á despedir léjos de esta superficie cierto número de las partículas de que se compone cada rayo luminoso incidente. Llegadas á corta distancia de la superficie, dichas partículas experimentan la accion de esta fuerza, y su curso, al principio rectilíneo, tuerce, describe una curva cuya convexidad mira hácia la superficie reflectora para emprender, á partir del punto en que más se acerca á esta, una marcha precisamente simétrica de la primera mitad de la trayectoria (2). Representando *Sa* en tamaño y direccion la velocidad de la molécula luminosa en el momento en que comienza la esfera de actividad de la fuerza repulsiva, se puede descomponer esta velocidad en otras dos: una *Sm*, paralela á la superficie, no sufre alteracion; otra *Sp*, perpendicular al plano de reflexion, está directamente opuesta á la fuerza repulsiva, y por consiguiente será destruida progresivamente por ella. La molécula S va pues á describir una curva acercándose á la superficie hasta el punto M, en que la resultante de la componente normal y de la fuerza repulsiva será nula. A partir de este punto, la componente paralela y la fuerza repulsiva reunidas van á devolver poco á poco á la molécula luminosa su velocidad inicial; esta molécula describirá al alejarse del plano reflector una curva simétrica de SM, MS′, de suerte que la nueva direccion formará con la normal un ángulo de reflexion precisamente igual al de incidencia.



*Fig. 134.*—Teoría de la reflexion en el sistema de la emision

En el sistema de la emision, la refraccion tiene por causa, no una fuerza repulsiva, sino una atractiva, sin la cual no se hubiera comprendido en efecto cómo el rayo luminoso, no tan sólo penetraba en el nuevo medio, sino que seguia en él una direccion distinta de la direccion incidente, y más inmediata á la normal. En esta hipótesis, la componente normal de la molécula luminosa aumenta progresivamente con la fuerza atractiva que va creciendo con rapidez, á medida que se acerca á la superficie refringente: describe una curva hasta que, en el interior del medio, llega á una distancia en que la fuerza atractiva obra lo mismo á un lado que á otro. Entónces la molécula continúa su camino en línea recta en su nueva direccion. Fácilmente se comprende que el efecto de la fuerza atractiva produce un aumento en la velocidad de la molécula, puesto que, no habiendo cambiado la componente paralela, la componente normal ha aumentado con toda la intensidad de la atraccion. Así pues, en el sistema de la emision la velocidad de la luz debe ser mayor en un medio refringente cualquiera que en el vacío, y tanto más cuanto más lo sea á su vez el índice de refraccion.

Ahora, ¿cómo conciliar la explicacion de los fenómenos de la reflexion con la de los de la refraccion? Como lo ha dicho Biot, uno de los más distinguidos y persistentes defensores de la teoría newtoniana, estas dos explicaciones parecen contradictorias. La segunda requiere «que la afinidad de las moléculas para con la

(1) En efecto, Newton habia debido suponer que estas moléculas son de excesiva tenuidad, á fin de hacer comprender cómo pueden atravesar libremente las masas de los cuerpos trasparentes y llegar á cada momento á herir las delicadas membranas de nuestros ojos sin lastimarlas. Comparadas con las dimensiones de las partículas de la luz, las desigualdades de la superficie de los cuerpos más tersos, los gránulos de polvo que sirven para bruñirlos haciendo desaparecer las asperezas más marcadas, son masas considerables. Por lo tanto, si la luz se reflejara á la manera de los cuerpos elásticos, tocando realmente la superficie del espejo, las moléculas luminosas se desviarian en todas direcciones á causa de las asperezas de esta superficie, y como decia Biot, «la reflexion en los cuerpos mejor pulimentados por nuestro arte apénas seria ménos tosca que en los cuerpos más ásperos. Pero siendo en ellos, por el contrario, incomparablemente más abundante, regular y perfecta, esto prueba que las cosas no suceden como en la reflexion mecánica de los cuerpos elásticos, y que las partículas luminosas que se reflejan no llegan hasta ponerse en contacto con los cuerpos.»

(2) La componente normal *Sp* de la molécula S disminuye progresivamente por la influencia creciente de la fuerza repulsiva, al paso que la componente paralela *Sm* continúa invariable. En M la primera queda anulada; mas á partir de este punto la fuerza repulsiva restituye en sentido contrario á la molécula su velocidad normal. La ley de la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexion se explica por esta simetría de accion de la fuerza repulsiva.

luz produzca la refraccion de los rayos luminosos,» al paso que «las mismas moléculas parecen rechazadas por el cuerpo reflector, en lugar de ser atraidas por él.»

De aquí la necesidad de formular una nueva hipótesis, que por lo demás le sugirió á Newton la necesidad de explicar otros fenómenos, los de los anillos coloreados en las láminas ténues, fenómeno que en breve describiremos. Esta hipótesis es la de los *accesos de fácil trasmision* y de los *accesos de fácil reflexion*, y consiste en que toda molécula luminosa se halla durante el curso de su propagacion en disposiciones alternativas y periódicas. A cada reproduccion ó renovacion de una de estas disposiciones, la molécula puede ser *fácilmente trasmitida*; y en cada intervalo se encuentra por el contrario en disposicion de ser *fácilmente reflejada* (1).

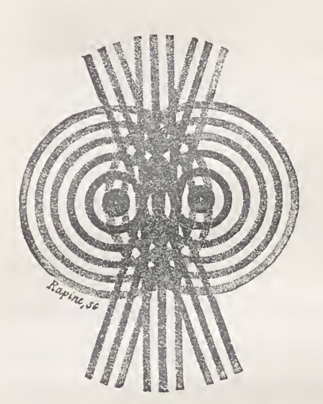


*Fig. 135.*—Experimento de difraccion Franjas oscuras y franjas brillantes producidas por un sistema de dos pequeñas aberturas circulares.

Los partidarios de la teoría de la emision y áun el mismo Newton no han llegado á aclarar de una manera positiva en qué consisten estas disposiciones singulares que hacen que tan pronto sea la fuerza repulsiva como la atractiva la que actúa sobre las moléculas luminosas en el momento en que entran en la esfera de actividad de estas fuerzas opuestas. Por lo demás, no es este el lugar oportuno de exponer íntegramente una teoría que hasta mediados del siglo actual ha tenido partidarios ilustres y que ha bastado largo tiempo para explicar todos los fenómenos de la luz. La teoría de las ondulaciones ha prevalecido definitivamente, habiéndola erigido los magníficos trabajos de nuestro gran Fresnel sobre la sólida base del cálculo, cimentada á su vez en comprobaciones prácticas.

(1) Hé aquí la definicion dada por Newton en su *Tratado de óptica*: «Llamaré accesos de fácil reflexion á las renovaciones de la disposicion de un rayo cualquiera á ser reflejado, del propio modo que daré el nombre de *accesos de fácil trasmision* á las renovaciones de su aptitud para ser trasmitido, y al espacio que media entre cada renovacion y la siguiente, *intervalo de los accesos.*»

## III

### TEORÍA DE LAS ONDULACIONES

Por lo general se hace remontar hasta Descartes el orígen del sistema de las ondulaciones. Verdet, en sus *Lecciones de óptica*, combate este aserto, al que ha prestado Eulero la autoridad de su crédito, pero que sin duda es erróneo. El único punto comun entre la teoría de las ondas y la de Descartes es la hipótesis de un medio que trasmite la luz; mas para él este medio es el *lleno absoluto*. Verdad es que considera la luz como efecto de cierto movimiento vibratorio de las partículas de los cuerpos; pero este movimiento no es trasmitido por ondas sucesivas, sino que para Descartes es el orígen de un impulso que se comunica á cualquier distancia sin ningun intervalo de tiempo.

Aun cuando se advierte algun indicio de la teoría de las ondulaciones en los escritos de Leonardo de Vinci, de Galileo y en una obra de Ango, en realidad le cabe á Huygens el honor de haberla fundado verdaderamente. Eulero, Tomás Young y últimamente Fresnel han completado las apreciaciones de Huygens y fundado sobre bases inquebrantables la verdadera teoría de la luz. Procuremos dar una idea de ella.

El primer principio en que se basa es la existencia en todo el espacio, lo mismo en lo que se llama el vacío interplanetario ó intersidéreo. que entre las moléculas de todos los cuerpos, de un flúido eminentemente elástico que ha recibido el nombre de *éter*. El éter está difundido con uniformidad absoluta en el vacío de toda materia ponderable, de suerte que su densidad en él es constante, y su elasticidad la misma en todos sentidos. Por el contrario, en los medios ponderables, es decir, en los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos, es posible que la densidad del éter sea distinta de la que posee en el vacío; pero no por eso deja de ser constante, lo propio que su elasticidad, si dichos cuerpos son homogéneos y no cristalizados. En los cristales cuya forma primitiva no es un poliedro regular, la elasticidad varia segun la direccion.

Los manantiales luminosos son cuerpos cuyas moléculas se hallan animadas (en condiciones especiales, como cierto grado de temperatura,

combinaciones químicas, etc.) de movimientos vibratorios periódicos de excesiva rapidez. Estas vibraciones se comunican al éter y se propagan por él en forma de ondas que son esféricas en el vacío ó en los medios homogéneos no cristalizados, pero que pueden tener otras formas, ser verbigracia elipsoidales, en los medios en que la elasticidad del éter varia con la direccion, como en ciertos cristales.

Miéntras una molécula de éter efectúa una oscilacion completa correspondiente á la vibracion de orígen, su movimiento oscilatorio se comunica sucesivamente á una fila de moléculas semejantes situadas en la direccion de un radio de la esfera. El tiempo necesario para la ida y la vuelta de la molécula etérea es la *duracion de la vibracion*, y la distancia á que se ha propagado durante este tiempo, es decir, la distancia entre dos moléculas animadas de la misma velocidad de oscilacion y en la misma fase oscilatoria es lo que se llama longitud de oscilacion ó *longitud de onda*. Por último, la *superficie de la onda* es el conjunto de los puntos en que ocurre en un mismo instante la conmocion luminosa; superficie que es esférica cuando el éter tiene igual elasticidad en todos sentidos en el medio en que la luz se propaga; á gran distancia del foco, claro está que la superficie de la onda se puede considerar como plana.

Las ondas luminosas y las ondas sonoras presentan, bajo ciertos puntos de vista, analogías que se adivinan fácilmente una vez conocidas las definiciones anteriores; unas y otras son efecto de las vibraciones de las moléculas de los orígenes de la conmocion, y como estas vibraciones son isócronas, las ondas lo son tambien cuando proceden de un sonido ó de una luz simple. La onda sonora se propaga uniformemente, como las luminosas. Las vibraciones sonoras más ó ménos rápidas producen sonidos cuyo timbre musical crece á la par del número de ondas que llegan al oido en un mismo intervalo de un segundo. Así tambien, hay ondas luminosas cuyo período difiere en duracion; las más largas ó más lentas corresponden á la parte ménos refrangible del espectro ó á los rayos rojos, y cuando cobran mayor rapidez, ó se van acortando, el color de la luz producida cambia, pasa del rojo al amarillo, al verde, al azul y al morado, pasando por todos los matices de la faja coloreada que da el análisis prismático de la luz blanca. Así pues, los colores sucesivos vienen á ser los *tonos* de la luz.

Pero si son muchas las analogías que existen

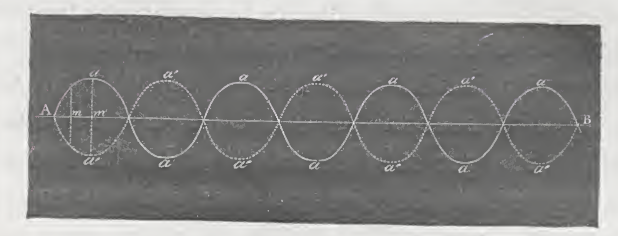



*Fig. 136.*—Interferencia de las ondas luminosas

entre el sonido y la luz, entre las ondas sonoras y las luminosas, no por eso dejan de ser bastante grandes las diferencias y algunas de ellas de capitalísima importancia teóricamente consideradas.

En primer lugar, el medio en que se propaga el sonido, debe ser siempre un medio ponderable, gaseoso, sólido ó líquido. Las ondas de la luz, por el contrario, nacen y se propagan por el vacío de toda materia ponderable, y cuando penetran en los cuerpos, siempre es el mismo medio elástico más ó ménos condensado, el éter, el que las constituye con las oscilaciones periódicas de sus moléculas.

La velocidad de propagacion, uniforme y constante, con la cual se trasmite una conmocion por un medio elástico depende, como lo prueba la teoría, de la relacion que existe entre la elasticidad del medio y su densidad. En el aire se propagan las ondas sonoras con una velocidad de unos 340 metros por segundo. En el éter del vacío hemos visto que las ondas luminosas recorren, en el mismo espacio de tiempo, 300 millones de metros, distancia casi 900,000 veces tan grande como la primera. De donde resulta que la elasticidad del éter es extraordinaria y su densidad sumamente escasa, ó tambien que uno y otro elemento son á la vez, el primero considerable y el segundo muy débil.

Conociendo la velocidad del sonido y el número de vibraciones de un sonido dado en un segundo, fácilmente se deduce la longitud de la onda sonora correspondiente; es poco más ó ménos $0^{m},4$ para el *la* del diapason. Ya veremos que se ha procedido de distinto modo con respecto á las ondas luminosas. Como son demasiado rápidas para que se pueda contar su

número y no hay medio alguno de poder inscribirlas, se ha determinado su longitud. Fresnel ha hecho experimentos que le han permitido calcular la longitud de ondulacion de la luz roja homogénea que atraviesa un cristal de color, y tomando por unidad el milímetro, ha visto que era igual á $0^{mm},000638$, cantidad extraordinariamente menor que la longitud de una onda sonora. Resulta de aquí que la rapidez con que se suceden las ondas luminosas es excesiva. En efecto, la luz recorre en un segundo 300 millones de metros; por consiguiente la luz roja de que acabamos de hablar era producto de vibraciones que se sucedian en un segundo tantas veces como el número $0^{mm},000638$ está contenido en 300 millones, ó sea 470 billones.

Hemos dicho que las longitudes de onda varían con el color ó con la refrangibilidad de la luz. Lo propio sucede con los números de vibraciones correspondientes, efectuadas por las moléculas de los focos luminosos ó por las del éter. El cuadro siguiente se refiere á los colores principales del espectro de la luz solar:

| COLORES PRINCIPALES | Longitudes de onda en millonésimas de milímetro. | Número de vibraciones en billones. |
|---|---|---|
| Morado extremo. . . . . . | 406 | 739 |
| Morado. . . . . . . . . . | 423 | 709 |
| Morado añil. . . . . . . | 439 | 683 |
| Añil. . . . . . . . . . | 449 | 668 |
| Añil azul. . . . . . . . | 459 | 654 |
| Azul. . . . . . . . . . | 475 | 631 |
| Azul verde.. . . . . . . | 492 | 610 |
| Verde. . . . . . . . . . | 512 | 586 |
| Verde amarillo. . . . . . | 532 | 564 |
| Amarillo. . . . . . . . | 551 | 544 |
| Amarillo anaranjado. . . . | 571 | 525 |
| Anaranjado. . . . . . . | 583 | 514 |
| Anaranjado rojo.. . . . . | 596 | 504 |
| Rojo. . . . . . . . . . | 620 | 484 |
| Rojo extremo.. . . . . . | 645 | 465 |

El valor medio de la longitud de una onda luminosa apénas excede de la mitad de un milésimo de milímetro, de suerte que en el espacio de un metro hay por lo ménos dos millones de ondulaciones. En cuanto á formarse una idea del número prodigioso de ondas que se suceden en un sólo segundo, número que asciende á 600,000 billones, es cosa superior al alcance de nuestra imaginacion. Pero no debemos olvidar que todas las magnitudes y dimensiones con las que estamos familiarizados, distancias, velocidades, tiempos, son puramente relativas; en el dominio de lo real, es tambien fácil concebir de este modo lo que nos parece infinitamente grande. Tanto en la teoría de las ondulaciones como en la de la emision, las cifras que sirven para medir los elementos constitutivos de la luz, son igualmente considerables. Lo que ha permitido decidir entre ambas teorías, es que todas las dificultades que resultan de la adopcion de una ú otra se han allanado respecto de la primera, al paso que los partidarios de la emision tenian forzosamente que ir acumulando hipótesis para explicar los hechos nuevos á medida que se presentaban. Estas hipótesis, muy ingeniosas con frecuencia, han sido insuficientes en ciertos casos, y hasta han tropezado con contradicciones formales de la experiencia. Por el contrario, la teoría de las ondulaciones ha resultado bastante fecunda para proporcionar de antemano indicaciones de nuevas verdades, consecuencias necesarias de los principios que la observacion ha confirmado en seguida. Citaremos algunos ejemplos de varias pruebas de esta clase.

# CAPÍTULO XII

## FENOMENOS DE DIFRACCION

### I

### INTERFERENCIA DE LAS ONDAS LUMINOSAS.—FENÓMENOS DE DIFRACCION

El P. Grimaldi publicó en Bolonia en 1665 un curioso libro titulado *Physico-matesis de lumine*, en el cual describió por vez primera ciertos fenómenos á los cuales dió el nombre, que áun conservan, de fenómenos de *difraccion*. Véase en qué consisten estos hechos nuevos, ó por lo ménos nuevamente observados, que los físicos han estudiado y multiplicado despues hasta el punto de constituir con ellos una rama importante de la óptica.

Si se introduce un rayo de luz en la cámara oscura al través de un pequeñísimo orificio, se

ve que la sombra de los cuerpos opacos estrechos, expuestos á esta luz, son mucho más extensas de lo que deberian serlo con arreglo á la marcha rectilínea de los rayos luminosos. Además dichas sombras aparecen rodeadas de franjas de colores, paralelas entre sí y á los bordes de los cuerpos opacos. El fenómeno desaparece si en lugar de penetrar el haz de luz por un pequeño orificio, pasa por un agujero ancho.

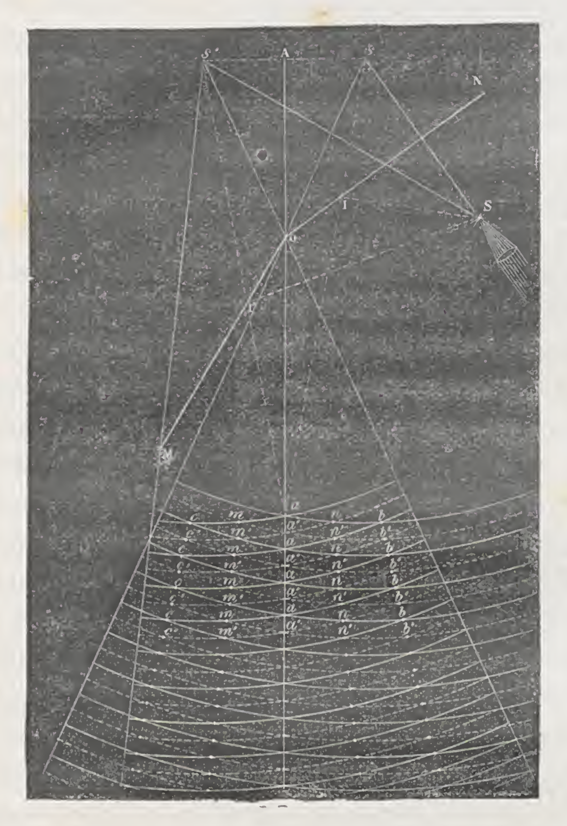


*Fig. 137.*—Experimento de los dos espejos de Fresnel; demostracion práctica del principio de las interferencias

Reemplazando el cuerpo opaco por un pequeñísimo orificio practicado en una lámina metálica, por ejemplo, y recibiendo la luz en una pantalla, se obtienen anillos concéntricos de franjas de colores, situadas unas en la imágen geométrica del orificio, y otras fuera, es decir, dentro de la sombra de la lámina. Por último, si hay dos aberturas muy contiguas, resultan dos series de anillos que se superponen en parte, y además se ven tres series de franjas rectilíneas, que desaparecen tan luégo como se tapa una de las aberturas (fig. 135). Este experimento causó profundo asombro entre los físicos porque trastornaba todas las ideas que hasta entónces se habian formado sobre la naturaleza del agente luminoso. Y en efecto, hacia patente el resultado singular de que la *luz agregada á la luz produce en ciertos casos oscuridad.*

Newton estudió los fenómenos de difraccion revelados por el físico boloñés; agregó nuevas observaciones y procuró explicar la difraccion diciendo que es una desviacion que los bordes de los cuerpos opacos causan á los rayos de luz. Frauenhofer, Young y últimamente Fresnel acabaron de descubrir sus leyes, y el tercero las fundó con feliz éxito en la teoría de las ondulaciones.

Antes de proseguir la descripcion de los fenómenos, demos una idea de lo que Young ha llamado *principio de las interferencias*, cuya teoría ha expuesto en el sistema de las ondulaciones y que Fresnel demostró más adelante por medio del famoso experimento de los dos espejos.

Supongamos que dos rayos de luz siguen la direccion AB, (fig. 136), que su intensidad es igual y que lo son tambien las longitudes de onda de cada uno (1), en cuyo caso los movimientos de vibracion del éter tendrán la misma amplitud en las mismas fases. Si las ondas del primer rayo coinciden con las del segundo, claro está que sus intensidades deberán agregarse, y que á causa de esta mutua agregacion aumentará la cantidad de luz. Pero si uno de ellos se retrasa un tanto, y este retraso es precisamente igual á una semilongitud de onda, las moléculas de éter situadas á lo largo de la línea AB serán atraidas, de un lado por fuerzas cuya intensidad y direccion estarán representadas por la curva *aaa*, y de otro lado por fuerzas iguales y contrarias representadas por la curva $a'\,a'\,a'$. Por consiguiente, toda molécula como *m* permanecerá en reposo bajo la accion de estas fuerzas opuestas; el movimiento vibratorio cesará y la oscuridad sucederá á la luz. Entónces se dice que las ondas ó los rayos luminosos

(1) El raciocinio anterior no es «aplicable sino á sistemas compuestos de ondas de igual longitud, porque si las del uno fuesen mayores que las del otro, por pequeña que fuese la diferencia sucederia que la posicion relativa de las ondas no seria la misma en toda la extension de los dos grupos, y al paso que las primeras ondas se contrariarian casi completamente, las siguientes no estarian ya en total discordancia, y hasta acabarian por concordar un poco más lejos; de lo cual resultaria una sucesion de vibraciones débiles y fuertes análogas á las pulsaciones que produce la consonancia de dos notas poco distintas; pero sucediéndose con rapidez prodigiosa estas alternativas de luz fuerte y débil, sólo producirian en el ojo una sensacion continua.» (A. Fresnel, *De la luz*, etc.)

*interfieren.* Lo propio resultaria si el retraso fuese de $^3/_2$, $^5/_2$..... y en general de un número impar de semi-ondulaciones. Si el número de estas es par, el resultado es el mismo que si hubiese coincidencia. Finalmente, entre estos dos casos extremos, tan pronto aumenta como disminuye la intensidad luminosa, pero sin que en ningun punto haya destruccion absoluta de luz.

Teóricamente considerado, este raciocinio, que es una consecuencia necesaria del sistema de las ondulaciones, explica perfectamente el experimento de Grimaldi y todos aquellos en que aparecen franjas oscuras ó brillantes. Faltaba sin embargo comprobarlo por la observacion.

Young se habia ocupado, ántes de estudiar óptica, de las leyes de las vibraciones de los tubos sonoros, y segun parece, el fenómeno de las pulsaciones fué el que le sugirió la primera idea de la interferencia de las ondas luminosas. Planteó este principio y lo aplicó á la explicacion de muchos fenómenos, despues de haber dado con su demostracion práctica. Una observacion casual le puso sobre la vía de esta prueba directa.

«Habiendo tenido ocasion de observar la sombra de un cabello alumbrado por una hendidura luminosa muy angosta, advirtió en medio de la sombra una franja blanca y brillante entre dos franjas oscuras. Repitió el experimento poniendo en lugar del cabello un rectángulo opaco muy estrecho, y vió en la sombra de este rectángulo una serie de franjas alternativamente brillantes y oscuras. La franja central es blanca y orlada de dos franjas oscuras; las otras franjas brillantes son de colores bastante marcados y tanto más cuanto más distan del medio de la sombra. Young hizo tambien otra observacion importante; interceptando con una pantalla opaca la porcion de luz que pasaba contigua á uno de los bordes del rectángulo, vió desaparecer completamente las franjas que habia en el interior de la sombra. Despues de esto era difícil negarse á admitir que estas franjas tienen por causa el concurso de los rayos que pasan cerca de los dos bordes opuestos de la pantalla opaca. Young ideó otro experimento más concluyente todavía para demostrar la existencia de las interferencias luminosas. Hizo pasar el haz de rayos solares trasmitido por un pequeño orificio practicado en la ventana de la cámara oscura, á otros dos orificios estrechos y contiguos, abiertos en una pantalla opaca; recibió en una segunda pantalla los dos conos luminosos dilatados por la difraccion de modo que se encuentran á cierta distancia, y vió en la sombra de la parte opaca situada entre los dos orificios de la primera pantalla una serie de bandas finísimas alternativamente brillantes y oscuras, que eran tanto más estrechas cuanto mayor distancia mediaba entre los dos agujeros. Dichas bandas desaparecian tan luégo como se cerraba uno de ambos agujeros, y lo propio sucedia cuando se sustituia al haz único que pasaba por un agujero angosto la luz solar directa ó la de una llama artificial, es decir, cuando se volvia á la disposicion adoptada por Grimaldi (1). Por lo demás, las bandas ocupaban exactamente las posiciones en que segun la teoría debian reforzarse ó debilitarse recíprocamente los movimientos vibratorios.» *(Lecciones de óptica física,* por E. Verdet.)

El sabio físico de quien hemos tomado el párrafo anterior hace observar que los experimentos de Young, por ingeniosos que fuesen, sólo probaban la interferencia en cuanto á los rayos difractados, modificados por un fenómeno imperfectamente conocido, y que restaba saber si era un principio aplicable á todos los rayos luminosos.

Esto es lo que ha hecho Fresnel, valiéndose principalmente del experimento de los dos espejos á que hemos aludido ántes. Este experimento es sobrado importante para que dejemos de describirlo, pues áun cuando la índole y los límites de esta obra no nos permiten abordar la explicacion teórica de la mayoría de los fenómenos, por lo ménos debemos exponer su principio con toda claridad para que el lector acepte sus consecuencias con confianza.

Colócanse verticalmente en la cámara oscura dos espejos planos ON, OM (fig. 137), de metal ó cristal negro, de modo que formen entre sí un ángulo muy obtuso. Delante de estos espejos se concentra en S un haz de luz solar

(1) Segun Verdet, los experimentos de Grimaldi no dan verdaderas franjas de interferencia, por más que el físico boloñés haya dicho formalmente en su tratado que en ciertos casos pueden debilitarse dos luces al reunirse.

por medio de una lente esférica ó cilíndrica de tal suerte que dé un punto, ó bien una línea luminosa. En uno y otro espejo se forman dos imágenes, una en *s* que corresponde al espejo ON, y otras en *s'* correspondiente al otro espejo. Tiénense así dos focos de luz que presentan la particularidad de hallarse á cada momento en el mismo estado de vibracion por emanar de un foco comun. Si en seguida se coloca una pantalla vertical delante de los dos espejos, de modo que reciba á la vez los haces luminosos emanados de las dos imágenes, se verá en la pantalla una faja brillante en direccion de la prolongacion de la línea OA, y á cada lado de esta faja una serie de franjas alternativamente oscuras y brillantes. Si se tapa uno de los dos espejos, las franjas desaparecen al punto, y la pantalla queda uniformemente alumbrada.

Como se ve, el fenómeno es el mismo que en el experimento de los dos orificios de Tomás Young, faltando explicar cómo la luz agregada á la luz puede producir oscuridad; segun hemos visto, es preciso demostrar que donde quiera que haya franjas oscuras, consiste en que interfieren las ondas luminosas emanadas de los dos focos, y en que por el contrario están en la misma fase donde quiera que se ven las franjas brillantes. Así lo representa la fig. 137, donde se ven trazadas las ondas concéntricas emanadas de *s* y *s'*. Estos dos sistemas de ondas se cruzan y cortan en varios puntos; pero algunos de estos que, como los marcados con la letra *a*, están situados en la perpendicular AO á *ss'*, se hallan tanto en uno como en otro sistema en la misma fase de ondulacion, puesto que siendo los rayos *sa*, *s'a* de igual longitud, sucede lo propio con los trayectos SI*a* y SI'*a*, recorridos por las dos ondas luminosas emanadas del foco S y reflejadas en uno y otro espejo. Lo propio sucede con todos los puntos *a'a'a'* situados en el plano vertical que pasa por AO. Así pues, las intensidades luminosas se agregan en este plano, resultando la franja brillante central. En ciertos puntos, como *n n'* la diferencia de marcha de las ondas que en ellos se cruzan es de $1/2$, $3/2$.... longitudes de onda, es decir, de un número impar de semi-ondulaciones; hay interferencia y por consiguiente franja oscura, sucediendo otro tanto con los puntos *m m'*... Más léjos, los puntos *bb'*... *cc'*... pertenecen á rayos cada uno de los cuales tiene sobre el otro un retraso de un número par de semi-longitudes de onda: *franjas brillantes*... y así sucesivamente. Tan luégo como se tapa con una pantalla uno ú otro de ambos espejos, las franjas desaparecen, y la primera pantalla, en la cual se recibia dichas franjas, recobra un brillo uniforme.

Fresnel ha empleado sucesivamente luces de todos los colores simples para hacer este experimento capital; y han resultado franjas de cada una de estas tintas, pero tanto más juntas cuanto más se alejan del rojo en la serie de los colores prismáticos. El morado da las franjas más estrechas. Midiendo con gran precision las distancias de las franjas dadas por la luz roja, ha conseguido el ilustre físico deducir de ellas las longitudes de onda de las luces de varios colores, y por lo tanto el número de vibraciones efectuadas por el éter en el breve intervalo de un segundo, número tan prodigiosamente grande como ya hemos indicado. Las franjas procedentes de la luz blanca deben estar formadas por las franjas coloreadas con cada una de las tintas del espectro, sobrepuestas de modo que el morado esté junto á la banda brillante central. Así lo demuestra tambien la observacion.

De este modo quedó confirmada con un experimento memorable la verdadera teoría de las ondulaciones, de la cual ha sabido sacar el análisis matemática una porcion de consecuencias, unas conocidas ya por la observacion, y otras que se anticiparon á ella y le sirvieron de guía. Los nombres de Huygens, Young y Fresnel irán por siempre unidos á tan hermosa teoría como lo está el de Newton á la de la atraccion universal.

## II

### FENÓMENOS DE DIFRACCION POR PEQUEÑAS ABERTURAS

Volvamos ahora á los fenómenos de difraccion, todos los cuales se relacionan con el principio de la interferencia de las ondas luminosas. Como estos fenómenos son muchos, sólo nos ocuparemos de algunos de los más notables.

Repitiendo Newton por distintas maneras los experimentos del P. Grimaldi sobre las som-

bras amplificadas de los cuerpos delgados, como cabellos, hilos, alfileres, pajas, etc., pudo cerciorarse de que la desviacion de los rayos luminosos no tenia por causa, como se creyó en un principio, una refraccion en una tenue capa de aire más densa que rodeaba al cuerpo (hipótesis sostenida por Mairan). Asimismo vió que las franjas se formaban siempre, cualquiera que fuese la sustancia empleada; y ya consistiese esta en metales, ó en piedras, vidrio, madera, hielo, etc., siempre se notaban tres franjas situadas de este modo á partir de la sombra: franja interior: morado, azul oscuro, azul claro, verde, amarillo y rojo; franja intermedia: azul, amarillo y rojo; franja exterior: azul claro, amarillo claro y rojo. Notó tambien que las luces simples del espectro dan franjas desigualmente agrupadas. Pero de todos estos experimentos no dedujo otra cosa sino que al rasar los rayos de luz los bordes de los cuerpos experimentan inflexiones tanto más fuertes cuanto más de cerca rasan su superficie. Esta era una hipótesis natural en el sistema de la emision, pero ya acabamos de ver cuál era su explicacion verdadera.

Todos los experimentos, muy numerosos por cierto, efectuados posteriormente, pueden dividirse en dos clases: la primera comprende los fenómenos de difraccion producidos por bordes rectilíneos, verbigracia, por una ó muchas aberturas muy angostas en forma de paralelógramo, ó por una delgada pantalla, ó un alambre, ó un cabello; á la segunda corresponden los fenómenos que resultan cuando la difraccion se efectúa al través de una ó muchas aberturas pequeñísimas, cuadradas, triangulares, circulares ó en dos bordes de una pantalla circular de escaso tamaño. Entre estos sistemas de franjas, los hay irisados, que proceden de la luz blanca; monocromáticos, producidos por una luz simple, como la roja, y en muchos casos las franjas irisadas van acompañadas de una multitud de espectros pequeños cuyos vivos colores aumentan la belleza del fenómeno.

J. Herschel ha observado (y Arago estudiado despues que él) curiosos efectos de difraccion colocando delante del objetivo de un anteojo astronómico diafragmas de variadas formas, observando de este modo diferentes estrellas simples ó dobles. Con una abertura anular, ha visto anillos de colores que rodeaban las imágenes de los puntos luminosos, los cuales presentaban entónces discos semejantes á los de los planetas. Por el contrario, los diafragmas triangulares daban estrellas de seis rayos; una abertura formada por doce cuadrados concéntricos producia una estrella de cuatro rayos; y por último, abriendo regularmente triángulos equiláteros en el diafragma, obtuvo una serie de discos circulares ordenados en seis líneas que iban divergiendo á partir del disco central incoloro y muy brillante, estando cada uno de ellos rodeado de un anillo más ó ménos coloreado y amplificándose á modo de espectros conforme se alejaban del centro.

Todos estos fenómenos son á la verdad muy curiosos; los magníficos colores que presentan los convierten en otros tantos cuadros cuya variedad compite con su esplendor; mas para el físico ofrecen otro interés de mucho más precio, por cuanto son otras tantas confirmaciones de la teoría de las ondulaciones del éter. El análisis matemática, aplicada á los diferentes casos de difraccion, da resultados que concuerdan maravillosamente con los de la observacion. Hemos dicho ántes que ésta se habia anticipado á veces á ellos: en prueba de ello hé aquí un notable ejemplo. Habiendo sometido el geómetra Bisson al cálculo el problema que consiste en determinar la sombra y las franjas producidas por un pequeñísimo disco opaco expuesto á la luz que diverge de un punto luminoso, vió que el centro de la sombra debia ser tan brillante como si el disco no existiera; esta luz era el efecto resultante de la difraccion de las ondas luminosas en el borde de la pantalla. Semejante resultado era tan opuesto á las observaciones anteriores (1), que Poisson lo presentó como una objecion séria á la teoría de las ondulaciones. Mas como Arago hiciera el mismo experimento con el cuidado necesario, valiéndose de un pequeño disco de metal cimentado sobre una placa de cristal perfectamente homogéneo y diáfano (2), apareció el

(1) A lo ménos, así se creia entónces. A decir verdad, el astrónomo francés Delisle habia hecho ya en 1715 el experimento presentado por Poisson en refutacion de la teoría de Fresnel, y quedaba completamente olvidado un siglo despues. (V. Verdet, *Lecciones de óptica física.*)

(2) «Tan luégo como el diámetro de la pantalla es un poco grande, dice Fresnel, por ejemplo de un centímetro (la de Arago tenia dos mi-

punto luminoso, segun lo indicara el cálculo. Hubiérase dicho que la sombra la producia una pantalla agujereada en el centro. Este es sin disputa uno de los más hermosos triunfos de la teoría, un testimonio decisivo en favor del sistema de las ondulaciones y de la existencia del éter.

III

LOS RESALTOS.—FRANJAS POLICROMÁTICAS

Frauenhofer, cuyos magníficos experimentos sobre las rayas del espectro hemos mencionado ya, estudió los fenómenos de la difraccion con esa exactitud y precision que en tan alto

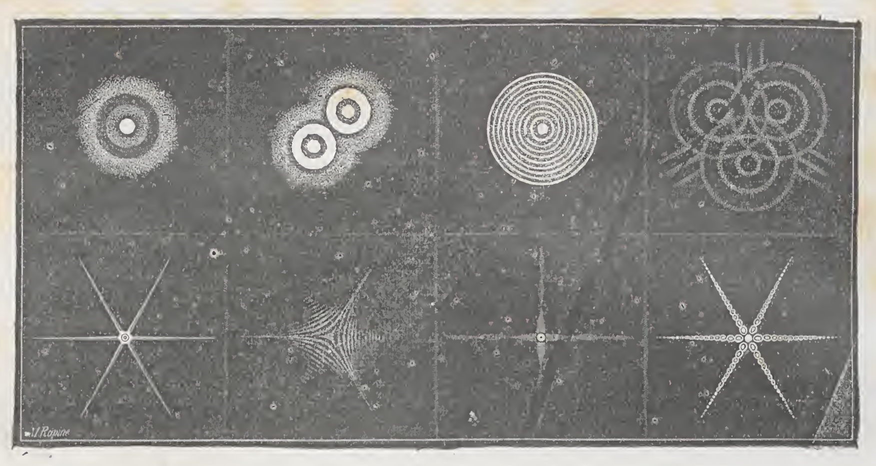


*Fig. 138.*—Efectos de difraccion en los anteojos astronómicos, segun J. Herschel

grado le distinguian. Despues de haber observado las imágenes formadas por un número muy limitado de pequeñas aberturas, concibió la idea de ver lo que ocurre cuando la luz atraviesa una red compuesta de una multitud de hilos muy finos, paralelos ó cruzados. Al pronto empleó una red de alambre formada por un gran número de hililos sujetos á un marco cuadrangular por medio de dos tornillos perfectamente semejantes. Para conseguir luégo mayor regularidad y delicadeza en los intervalos que daban paso á la luz, trazó sobre placas de vidrio cubiertas de una hoja de oro líneas equidistantes y paralelas; despues grabó las mismas rayas con un diamante en la misma placa, formando así más de 1000 divisiones por milímetro. Cada estría era una pantalla opaca, y los intervalos de las estrías daban paso á la luz. Conviene advertir que un número mucho menor de divisiones da más regularidad al resalto, y que en caso necesario bastan 38 rayas para observar los fenómenos.

límetros), los menores defectos de sus bordes ó de la placa de cristal en la que está fijada alteran la regularidad de los anillos oscuros y brillantes que rodean la mancha blanca del centro de la sombra. Es menester que al pequeño disco se le dé con sumo cuidado la forma de un cono truncado, de modo que sus bordes aparezcan cortados á bisel. La placa de vidrio debe estar en absoluto exenta de estrías y tener sus caras perfectamente planas.» Por la indicacion de estas precauciones se ve con cuánto cuidado se deben practicar los experimentos de óptica para que den buenos resultados.

Además de las redes de mallas paralelas, Frauenhofer estudió las de mallas cuadradas, formadas por dos series de líneas que se cruzaban en ángulo recto, así como las de mallas circulares ó de cualquiera otra forma. De este modo obtuvo un crecido número de figuras en que estaban distribuidas las franjas y los espectros con simetría maravillosa; pero aún hizo más; estudió las leyes de esta distribucion, leyes que, segun Babinet ha demostrado, son consecuencias necesarias del principio de las interferencias.

El fenómeno resultante del paso de la luz al través de una red de líneas paralelas presenta en medio una línea brillante, luégo dos anchos intervalos oscuros seguidos á cada lado de dos espectros con el morado vuelto hácia el centro y tan puros que se distinguen fácilmente en ellos las rayas oscuras. Más allá hay dos nuevas bandas oscuras, y por último dos series de espectros superpuestos cada vez más extendidos y más bajos de color. Una red de mallas cuadradas da, además de la línea brillante central y de dos series de espectros más extendidos que los de la red de mallas paralelas, una multitud de pequeños espectros en los cuatro ángulos irradiando hácia el centro. Newton habia adivinado la identidad de los fenómenos de difraccion por las aberturas pequeñas, como

se desprende del siguiente párrafo de su *Optica*: «Mirando el sol á través de una pluma ó de una cinta negra puesta muy cerca del ojo, se verán muchos arco-íris, porque las sombras que las fibras ó los hilos proyectan en la retina tienen en sus contornos idénticas franjas de colores.» Tambien se observan franjas de esta



*Fig. 139.*—Estrías del nácar de la perla vistas con el microscopio

clase mirando la luz de una bujía con los ojos entornados, pues al juntarse las pestañas forman las mallas de una red irregular.

Los físicos apelan á la interferencia de los rayos luminosos para explicar los brillantes colores que se notan en ciertos cuerpos cuya superficie está cubierta de una multitud de finísimas estrías; las plumas de algunas aves, la superficie del nácar se componen de gran número de rayas que reflejan todos los colores del prisma. Habiendo tenido Brewster ocasion de adherir un trozo de nácar á un goniómetro con una mezcla de resina y cera, quedóse sorprendido al ver que la superficie de la cera brillaba con los colores prismáticos del nácar; repitió el experimento con varias sustancias, como arsénico rojo, metal fusible, plomo, estaño y cola de pescado, y siempre vió aparecer los mismos colores. El inglés John Barton tuvo la idea de aplicar á otros cuerpos esta propiedad de las superficies estriadas, y al efecto talló en facetas muy finas botones de acero y varios dijes que á la luz del sol, de las bujías ó del gas, presentaban dibujos que brillaban con todos los matices del prisma. «Los destellos del diamante, dice Brewster, apénas ofuscan el brillo de estos colores.»

Véase ahora otro caso de observacion que parece tener conexion con los fenómenos de interferencia, segun lo ha explicado Babinet.

«Para disfrutar de la vista de este fenómeno, dice A. Necker al describirlo, es preciso situarse al pié de una colina interpuesta entre el observador y el sitio por donde el sol sale ó se pone. De este modo se está enteramente á la sombra; el borde superior de la colina ó montaña está cubierta de bosque ó de árboles ó malezas sueltas, que proyectan sus oscuros contornos sobre un cielo perfectamente claro y brillante, excepto por el sitio mismo por donde el sol está á punto de asomar ó acaba de desaparecer. Allí todos los árboles y matorrales que orlan la cúspide parecen de viva y nítida blancura, y brillan con extraordinario esplendor, por más que se destaquen sobre un fondo tan luminoso y brillante como lo está siempre la parte del cielo inmediata al sol. Los menores detalles de las hojas y de las ramitas se ostentan en toda su delicadeza, pareciendo los árboles y los bosques hechos de purísima plata con todo el arte del más hábil operario. Las golondrinas y demás aves que cruzan volando esta misma region semejan chispas de deslumbradora blancura.»

Vése pues que, para el que sabe observar, la naturaleza tiene una magnificencia con la que ni remotamente puede competir la habilidad de los experimentadores más ingeniosos. Lo que constituye el mérito del sabio no consiste precisamente en reproducirla, en multiplicar los fenómenos cuyo conjunto nos ofrece la naturaleza, sino en descubrir las causas de las cosas, las leyes de sus manifestaciones, á fuerza de paciencia, de sagacidad y de genio. Bajo este punto de vista, la historia de la física es indudablemente uno de los más bellos títulos de gloria del humano espíritu.

## IV

### ANILLOS DE COLORES DE LAS LÁMINAS TENUES

Los fenómenos más brillantes y maravillosos no son siempre los que requieren aparatos costosísimos y complicados para su reproduccion, ni tampoco mucho aparato y preparativos. ¿Quién no se habrá entretenido cuando niño en hacer y despedir al aire, con un poco de agua de jabon y una pluma ó una paja, esas leves burbujas de forma tan bonita y tan pura, y de tan varios y delicados colores?

Al principio, cuando la esfera líquida sólo tiene escaso diámetro, la película que limita sus contornos es incolora y trasparente. Mas, poco á poco, el aire que se insufla en su interior comprime por igual todas las partes de la superficie cóncava y agranda el diámetro á expensas del espesor; entónces comienza á aparecer una serie de colores, tenues al principio y luégo más vivos, que nacen unos á continuacion de otros y que forman con su mezcla una porcion de tintas irisadas, hasta el momento en que la burbuja, disminuyendo de espesor, no ofrece ya bastante resistencia á la accion del gas que contiene. Entónces se presentan en el vértice algunas manchas negras, y poco despues la pompa revienta.

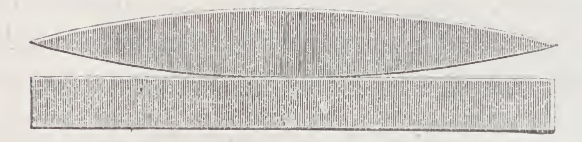


*Fig. 140.*—Lámina ténue comprimida entre dos cristales uno plano y otro convexo. Experimento de los anillos coloreados de Newton.

Este experimento tan sencillo, este juego infantil, que ofrece tantos atractivos á los ojos del artista aficionado á los colores, no es ménos ameno é interesante á los del sabio. Newton le consagró largo estudio y meditaciones, y desde aquel grande hombre los colores de la pompa de jabon ocupan un puesto legítimo entre los más curiosos fenómenos de óptica. A decir verdad, no pasa de ser un caso particular de toda la serie de fenómenos que se observan siempre que la luz se refleja y refracta sucesivamente en las superficies que limitan las láminas tenues de los cuerpos trasparentes. Los sólidos, los líquidos y los gases son tambien á propósito para esta clase de experimentos. Los cristales que se esfolian en hojas sumamente tenues, como la mica, el yeso, el talco, el vidrio soplado en esferita muy delgada, la superficie del acero recocido, cubierta de una capa de óxido, presentan colores irisados enteramente iguales á los de la pompa de jabon. Los vivos matices que adornan las alas membranosas de las libélulas, los que se notan en los fragmentos de vidrio expuestos largo tiempo á la humedad, así como en la superficie de las aguas grasientas, pertenecen á la misma serie de fenómenos, que se estudian en física bajo la denominacion comun de *anillos de colores de las láminas tenues.*

Antes de decir cuál es la causa de la descomposicion de la luz en sus colores simples ó primitivos, procuraremos dar una idea de las condiciones en que ocurre, y de las leyes que rigen para la sucesion de estos matices, tan cambiantes y movibles á primera vista.

Sigamos á Newton en sus memorables experimentos. El punto de partida del gran físico fué la observacion siguiente:

«Habiendo comprimido fuertemente, dice en su *Optica*, dos prismas uno contra otro, para lograr que sus lados (que por casualidad eran un tanto convexos) se tocasen mutuamente, ví que el sitio por donde se tocaban se volvia de pronto trasparente como si en aquel sitio hubiesen formado una sola pieza de vidrio. Porque, cuando la luz caia sobre el aire comprendido entre los dos prismas tan oblicuamente que se reflejaba en su totalidad, parecia que en el punto de contacto se trasmitia enteramente. Mirando con atencion dicho punto, se veia á modo de una mancha negra y oscura, parecida á un agujero á través del cual aparecian distintamente los objetos colocados al otro lado.»

Newton hizo girar los prismas alrededor de su eje comun, y vió aparecer poco á poco en torno de la mancha trasparente una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros, coloreados de diferentes matices. Para darse mejor cuenta del modo cómo se producian estos anillos, empleó dos cristales, uno plano y otro convexo en sus dos caras (fig. 140), ambos de un gran radio de curvatura. Luégo los aplicó uno contra otro, la cara convexa contra la plana, apretándolos suavemente: en esta posicion los dos cristales dejaban entre sí, al rededor del punto central de contacto, un menisco muy delgado, una capa de aire, cuyo espesor, nulo al principio, iba creciendo insensiblemente. Hé aquí los fenómenos que observó:

Recibiendo la luz reflejada en una direccion casi normal á la superficie plana de la capa de aire, vió que se formaba al rededor del punto de contacto una serie de anillos de varios colores, concéntricos y cada vez más apiñados á medida que se alejaban del centro. Cada color aparecia al principio como un círculo de tinta uniforme que se ensanchaba por la presion has

ta que saliendo del centro un nuevo color, trasformaba el primero en un anillo de colores. En el centro mismo apareció en último término una mancha oscura.

Véase ahora el órden y los colores de dichos anillos, representados en la figura 141. Los colores están indicados á partir del centro O.

De O á A negro, azul, blanco, amarillo, rojo;
A — B morado, azul, verde, amarillo, rojo;
B — C púrpura, azul, verde, amarillo, rojo;
C — D verde, rojo;
D — E azul verdoso, rojo;
E — F azul verdoso, rojo claro;
F — G azul verdoso, blanco-rojizo;

Si en lugar de recibir la luz reflejada en las dos superficies de la lámina tenue, se mira al través de los dos vidrios la luz del cielo, vése tambien una serie de anillos de colores, aunque más desvaidos que los de los anillos vistos por reflexion. Además, el órden de los colores es enteramente distinto, y en lugar de una mancha negra en el centro aparece una blanca. Hé aquí la serie de las diferentes tintas que forman los anillos vistos por trasmision:

Blanco, rojo-amarillo, negro, morado, azul;
Blanco, amarillo-rojo, morado, azul;
Verde, amarillo rojo, verde-azul, rojo;
Verde azulado;
Rojo, verde-azulado;
Rojo;

Comparando esta segunda serie con la primera, se ve que las tintas que ocupan el mismo órden en los dos sistemas de anillos son precisamente complementarias, de suerte que la luz trasmitida y la luz reflejada en un mismo punto de la capa de aire, dan reunidas luz blanca. Esta consecuencia de los dos experimentos ha sido comprobada por Young y Arago, quienes, habiendo colocado los dos cristales de modo que las luces reflejadas y trasmitidas llegasen al ojo á la vez y con la misma intensidad, vieron que desaparecian los anillos.

Newton se valió de las luces simples del espectro para observar los anillos. En este caso divisó por reflexion anillos alternativamente negros y luminosos, presentando los segundos el matiz de la luz simple empleada. Pero los diámetros de los anillos variaban de dimension segun el color de la luz, y se dilataban al pasar del morado al rojo. Desde este momento se comprende en qué consiste que los anillos obtenidos con la luz blanca sean irisados. Cada uno de los distintos colores de que está formada dicha luz produce su serie de anillos; pero como las dimensiones son diferentes, la superposicion no es exacta, los anillos oscuros desaparecen, porque los cubren varios matices de luz, excepto en el centro, y solamente donde estos matices se mezclan en proporcion conveniente, aparece el único anillo de luz blanca anteriormente observado. Si se pone agua entre los dos cristales, vuelven á aparecer los anillos, pero más pequeños, más juntos y de matices más débiles. Por último, si en vez de un medio líquido ó gaseoso, es el vacío el que forma la lámina tenue entre los dos cristales, se ven asimismo anillos de colores que no presentan diferencia apreciable con los que da el aire.

Newton no se limitó, con su sagacidad y precision habituales, á comprobar estos casos y otros en cuyos detalles no podemos entrar; sino que procuró averiguar la ley á que obedecia la formacion de dichos anillos, logrando así enlazar con el mismo principio los variados fenómenos que hemos descrito al principio de este capítulo, los colores irisados de las pompas de jabon y de las láminas tenues de todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos. Midió con cuidado los diámetros de los anillos sucesivos obtenidos con la luz simple, en el momento en que la mancha negra del centro indicaba que habia contacto entre los cristales, y en virtud de las relaciones geométricas que enlazan los diámetros con los espesores de la lámina tenue, dedujo estos mismos espesores, formulando las leyes siguientes:

*Los cuadrados de los diámetros de los anillos brillantes vistos por reflexion son entre sí como la serie de los números impares* 1, 3, 5, 7, 9......

*Los cuadrados de los diámetros de los anillos oscuros son entre sí como la serie de los números pares* 2, 4, 6, 8.....

En cuanto á los anillos vistos por trasmision, como ocupan posiciones precisamente inversas, estando reemplazado cada anillo oscuro por otro brillante y cada uno de estos por uno oscuro, sus diámetros obedecen evidentemente á las mismas leyes, pues de lo contrario las series de los números estarian invertidas.

Esto por lo que toca á las dimensiones relativas de los anillos brillantes y de los oscuros. Por lo que hace á los espesores de la capa de aire comprendida entre los vidrios, van naturalmente aumentando del centro de contacto á las extremidades; pero si se buscan los valores que corresponden á los anillos de diferentes órdenes, se ve que son entre sí *como los números impares* con respecto á los anillos luminosos, y *como los pares* relativamente á los negros ú oscuros.

Estas leyes tan sencillas son generales.

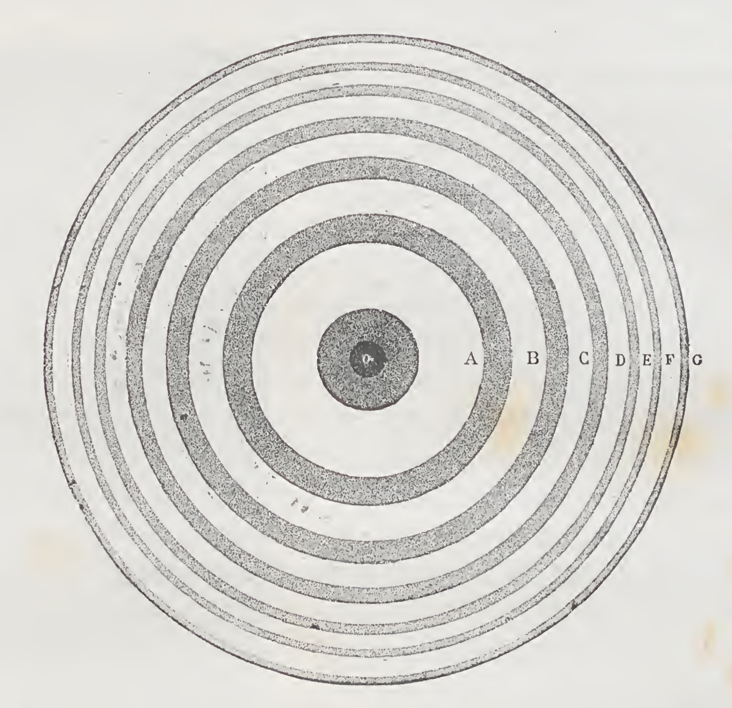



*Fig. 141.*—Anillos coloreados de Newton.

Newton infirió de ellas que el fenómeno de los anillos de colores depende del espesor variable de la lámina tenue interpuesta entre los dos vidrios, de la naturaleza de la sustancia de que se compone, y de ningun modo de los vidrios entre los cuales está comprendida. Trató de enlazarlo con la teoría de la emision de la luz, suponiendo que los rayos solares, al propagarse experimentan cambios periódicos que tan pronto los hacen aptos para reflejarse como para trasmitirse. Esta teoría es la que se conoce en la ciencia con el nombre de teoría de los accesos, accesos de fácil reflexion y de fácil trasmision, de que hemos hablado ya en el capítulo anterior.

Hoy, que la teoría de las ondulaciones ha prevalecido, el fenómeno de los anillos de colores se explica del modo más sencillo por el principio de las interferencias. Un rayo de luz que penetra hasta la primera parte de la lámina, se refleja y trasmite parcialmente hasta la segunda superficie, en la cual se refleja de nuevo. Los dos rayos contiguos así reflejados en cada superficie interfieren, es decir, se destruyen ó se agregan uno á otro, segun que el retraso del segundo equivalga á un número impar de semilongitudes de onda ó á un número par de estas mismas longitudes. De aquí resulta oscuridad en el primer caso, y por el contrario, luz en el segundo, ó bien anillos oscuros y anillos luminosos. El análisis, aplicado á este caso tan intesante de la teoría de las ondas, permite deducir de nuevo las leyes de los diámetros y de los espesores, tal cual Newton las comprobó primeramente por la experiencia. Como las longitudes de onda varian segun la naturaleza de la luz simple, y disminuyen del rojo al morado, se ve que los anillos de este último color deberian ser más compactos que los del primero. Ahora bien, ¿cómo puede ser aplicable esta teoría al fenómeno de los colores de las pompas de jabon, colores tan variables, tan movibles, y que continuamente se mezclan y se funden unos en otros? Newton fué tambien quien demostró la identidad de los anillos de colores obtenidos con los vidrios y de los anillos que aparecen en las pompas.

Para estudiar los segundos, cuidó de poner la burbuja de jabon á cubierto de la agitacion del aire exterior, que haciendo variar con irregularidad el espesor de aquella, parece confundir sus colores é impide observarlos con exactitud. «Tan luégo como solté una burbuja, dice, la cubrí con una campana de cristal muy trasparente, y por este medio sus colores aparecian en un órden muy regular como otros tantos anillos concéntricos que rodeaban la parte superior de la burbuja.» Cuando se toman estas precauciones se ve cómo aparecen los anillos de colores en el vértice de la pompa de jabon, dilatándose lentamente á medida que el agua va escurriendo hácia la parte inferior de la burbuja haciéndola más delgada, hasta que descendiendo ellos á su vez, acaban por desaparecer. La figura 142 representa la disposicion de estas bandas coloreadas. El fenómeno, por tal manera regularizado, pierde gran parte de su belleza á los ojos del artista, pero como se comprenderá gana mucho en interés bajo el punto de vista de la ciencia.

Veáse, segun Newton, el órden exacto de los anillos de colores, tal como los vió sucederse desde la primera coloracion de la burbuja hasta su desaparicion:

Rojo, azul; rojo, azul; rojo, azul; rojo, verde; rojo, amarillo, verde, púrpura; rojo, amarillo, verde, azul, morado; rojo, amarillo, blanco, azul, negro.

Ahora bien, si se compara esta serie con la de los colores de los anillos obtenidos con los dos vidrios del primer experimento, se reconoce que están exactamente colocados en sentido inverso. Y así debia ser, si la misma causa produce iguales efectos. En su orígen, la pompa es demasiado gruesa para que aparezcan los colores; es incolora. Poco á poco su espesor va disminuyendo, de suerte que al fin del fenómeno debe aparecer el negro correspondiente al menor espesor, del propio modo que la mancha negra de los primeros anillos se halla en el punto en que los dos vidrios están en contacto.

Todo cuanto acabamos de decir se refiere á los colores vistos por reflexion. Una vez formada la burbuja se la debe observar de suerte que refleje á la vista la luz de un cielo blanquecino, y para distinguir mejor los anillos y los colores, se pone por detrás un fondo negro. Pero asimismo se puede observar la burbuja de jabon mirando á su través la luz del cielo. Tambien se forman entónces anillos de colores; pero de brillo más débil, y sus colores sucesivos son complementarios de los que da la luz reflejada. Fácil es cerciorarse de este hecho, que

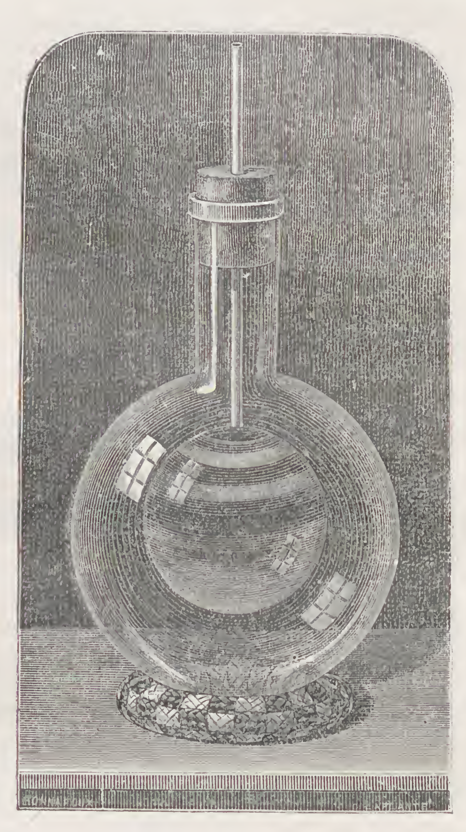


*Fig. 142.*—Anillos coloreados de las láminas ténues
Burbuja de jabon

hemos observado ya en los anillos obtenidos en la superficie de dos vidrios. Si miéntras se contempla la burbuja á favor de la luz de las nubes reflejada en el ojo, el color de su circunferencia es rojo, otro observador, mirando las nubes al través de la burbuja, verá azul su circunferencia. Por el contrario, si el contorno de la pompa es azul con una luz reflejada, parecerá rojo con otra trasmitida.

Ahora es ya fácil comprender por qué la pompa de jabon observada al aire libre presenta en los colores irisados de su superficie esa irregularidad, esa movilidad, esa perpetua mezcla de tintas que hacen de ella uno de los fenómenos más bellos debidos á la descomposicion de la luz por interferencia. La agitacion del aire alrededor de la pompa, unida á la falta de homogeneidad del agua de jabon en varios puntos y á lo desigual de la evaporacion, producen en la

película líquida una multitud de corrientes, que contrariando en todos sentidos la accion de la gravedad, impiden que el agua descienda por zonas regulares á la parte inferior de la burbuja. Su espesor varia de un punto á otro en diferentes sentidos, y como de él depende la formacion de las tintas, estas se reparten del modo más variado. En cambio, como en un frasco tapado el aire está saturado de vapor de agua, no hay evaporacion ni agitacion de aire, y los anillos aparecen con la regularidad que indica el cálculo.

Olvidábasenos decir que las leyes deducidas por Newton para los anillos proporcionan un medio de calcular el espesor de la lámina líquida, en los puntos en que tal ó cual color aparece. Este espesor es mínimo en los sitios en que se ven las manchas negras; viniendo á ser entónces la diezmilésima parte de un milímetro. Resulta de aquí que si se pudiera formar una pompa de jabon que tuviera en todas sus partes este espesor, seria totalmente invisible.

## V

### TEORÍA DE LAS ONDULACIONES. — REFLEXION Y REFRACCION DE LA LUZ

En el artículo II del capítulo anterior hemos hemos visto cómo explicaba Newton los fenómenos de reflexion y refraccion, en el sistema de la emision. Tratemos ahora de dar una idea del modo cómo se los explica en el sistema de las ondas.

La explicacion completa de estos fenómenos está basada en dos principios, llamados el uno, *principio de Huygens ó de las ondas envueltas*, y el otro *principio de las interferencias*, que, siguiendo á Th. Young y á Fresnel, hemos expuesto al principio de este capítulo.

En una obra tan elemental como la presente, no podemos abrigar la pretension de desarrollar en toda su extension la serie de demostraciones y consideraciones necesarias para comprender la explicacion teórica de los principales fenómenos de la Optica. Sin embargo, parécenos cuando ménos posible hacer apreciar su enlace.

El principio de Huygens consiste en que el movimiento de una onda luminosa en sus desarrollos sucesivos se puede considerar á cada momento, en un punto cualquiera de su superficie, como la resultante del movimiento que le precede. Hé aquí la definicion exacta que Fresnel da de dicho principio.

*Se pueden considerar las vibraciones de una onda luminosa en cada uno de sus puntos como la suma de los movimientos elementales que enviarian á él en el mismo instante y obrando aisladamente todas las partes de esta onda consideradas en cualquiera de sus posiciones anteriores.*

Siendo O (fig. 143) el punto luminoso del que emanan las ondas sucesivas, consideremos una de estas cuando ha llegado á AB. Al cabo de un espacio de tiempo dado, se propagará hasta A'B'. Segun el principio de Huygens, podemos considerar el movimiento vibratorio de cada uno de los puntos de la superficie de la onda A'B' como si procediera directamente del punto luminoso ó como si lo determinase la accion aislada de los puntos de la onda AB, á cada uno de los cuales se le mira como un centro de conmocion. Todas las ondas elementales emanadas de los puntos de AB, como *m n*, son esféricas, puesto que se supone al medio homogéneo y tienen por envolvente comun la onda A'B'.

Este principio bastaba á Huygens para explicar las leyes de la reflexion y de la refraccion segun las estableció la experiencia, pero la teoría quedaba incompleta, y Fresnel la terminó con toda precision, haciendo intervenir como veremos, el principio de la interferencia de las ondas luminosas.

Tomaremos por guía al mismo Fresnel, no en la demostracion general rigurosa que ha hecho de la reflexion y refraccion en el sistema de las ondas, sino en la exposicion más sencilla y elemental que ha escrito para el suplemento á la Química de Thompson.

«Sean ED y FG (fig. 144) dos rayos emanados del mismo centro de ondulacion, que supongo situado á distancia infinita, de suerte que dichos rayos son paralelos entre sí; sea AB la superficie reflectora; tracemos desde el punto G la recta GI, perpendicular á los rayos ED y FG: esta será la direccion de la onda incidente en el momento en que encuentra en G la superficie reflectora. Segun el principio de Huygens, podemos considerar cada uno de los puntos G y

D sucesivamente agitados por esta onda como si á su vez fuesen otros tantos centros de conmocion que, obrando aisladamente, enviasen rayos en una infinidad de direcciones y con distintas intensidades. Seria sin duda alguna muy difícil de descubrir la ley de las variaciones de su intensidad alrededor del punto radiante, mas por fortuna no tenemos necesidad de ello; porque, cualquiera que sea esta ley, es evidente que hallándose en casos absolutamente análogos los rayos elementales partidos de los puntos G y D que seguirán direcciones paralelas, deberán tener la misma intensidad é igual

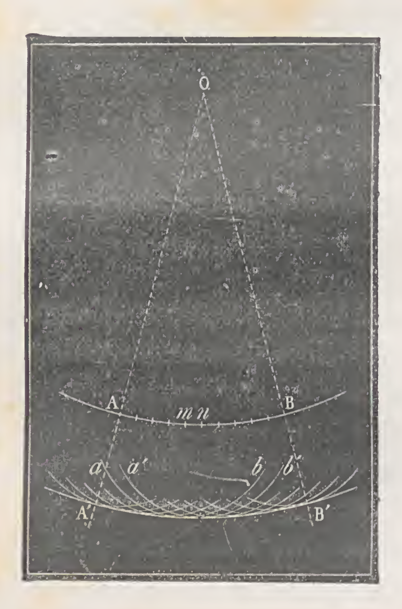



*Fig. 143.*—Principio de Huyghens, ó de las ondas luminosas

direccion de movimiento oscilatorio. Pues bien, este principio nos basta para juzgar la direccion en que pueden propagarse las vibraciones resultantes de la reunion de los rayos elementales. En efecto, consideremos la onda reflejada á una distancia infinitamente grande de AB con relacion al intervalo GD y á otros intervalos del mismo género; sean GK y DL dos rayos elementales reflejados, concurriendo hácia un mismo punto de esta onda; rayos que serán paralelos á causa de la distancia infinita á que se halla situado dicho punto. Supongo el ángulo KGB igual al ángulo EDA; claro está que las vibraciones traidas por los rayos GK y DL á su punto de reunion concordarán perfectamente; y en efecto, si á causa de la igualdad de estos ángulos se traza la perpendicular DC á GK, los dos triángulos GCD é IDG serán iguales, y por consiguiente GC lo será tambien á ID. Pero ID es la porcion de camino que el rayo incidente ED ha recorrido más que FG para llegar á la superficie; y GC es la porcion

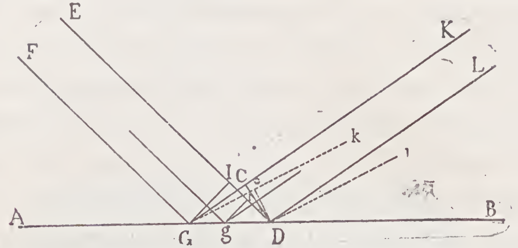



*Fig. 144.*—Teoría de la reflexion en el sistema de las ondas

de camino que el rayo reflejado en G debe recorrer más que el reflejado en D para llegar á su punto de reunion; luego, cuando hayan llegado, habrán recorrido en suma la misma longitud de camino, y por consiguiente vibrarán en él de acuerdo (1).

«Pero no sucede así cuando la direccion de los rayos elementales G*k* y D*l*, que supongo concurren tambien en un punto infinitamente remoto, forma con la superficie un ángulo que no es igual á EDA; porque no siendo tampoco igual á ID el intervalo G*c*, comprendido entre el punto G y el pié de la perpendicular D*c*, los caminos recorridos por los rayos para llegar al punto de reunion serán asimismo desiguales y sus vibraciones en este punto más ó ménos discordantes. Ahora bien, siempre se puede tomar el punto G á tal distancia del punto D que la diferencia entre G*c* é ID sea igual á una

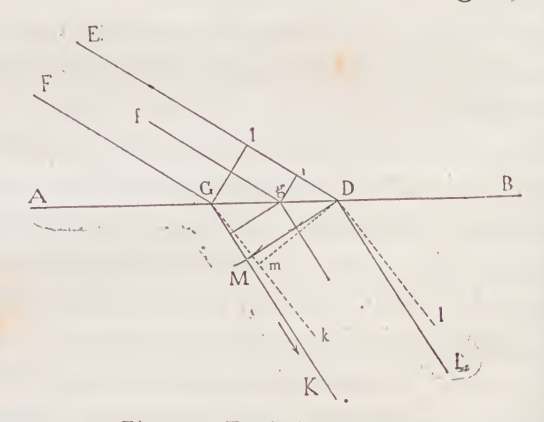



*Fig. 145.*—Teoría de la refraccion

semi-ondulacion, lo cual establecerá una dis-

(1) Tambien puede decirse que todos los rayos del haz comprendidos entre FG y ED, despues de haber tocado los diferentes puntos de la superficie reflectora de G á D, llegarán á la vez á la recta D que será la envolvente de todas las ondas elementales y formará la onda reflejada. En este punto se detenia la demostracion de Huygens; faltaba demostrar, como lo hizo Fresnel, que todos los rayos reflejados en otras direcciones se destruyen por interferencia, y que por lo tanto no hay luz perceptible sino siguiendo la direccion que da la ley de la reflexion. La misma observacion podrá aplicarse más adelante á la demostracion de la refraccion.

cordancia completa, en el punto de concurso, entre las vibraciones reflejadas en G*k* y D*l*; y como por otra parte estas tienen intensidades iguales se destruirán mutuamente, no habiendo por lo tanto luz propagada en esta direccion.»

Los mismos principios sirven para explicar las leyes de la refraccion, es decir, de la direccion que deben seguir las ondas luminosas cuando llegan á la superficie de separacion AB (fig. 145) de dos medios en los cuales no se propaga la luz con la misma velocidad. Considerando dos rayos incidentes paralelos FG, ED, que llegan simultáneamente á G y á I, se ve que el segundo tendrá que recorrer más que el otro el camino ID para llegar á la superficie. Tomando ahora los dos rayos refractados paralelos GK, DL, que parten de los mismos puntos G y D de la superficie, claro está que para llegar simultáneamente y de acuerdo á su punto de reunion (supuesto en el infinito), el primero tendrá que recorrer más que el segundo el camino GM. Si pues los caminos GM é IG se hallan precisamente entre sí en la misma relacion que las velocidades de la luz en el segundo y en el primer medio, los dos rayos llegarán uno á M y otro á D, al mismo tiempo, y los dos rayos refractados GK y DL continuarán perfectamente acordes durante toda su marcha y así llegarán al punto de reunion. La misma condicion llenarán sin duda todos los demás rayos elementales emanados de los diversos puntos de la superficie AB que concurren en el mismo punto; sus ondulaciones se sobrepondrán exactamente y se agregarán unas á otras.

Así pues, los rayos que hayan penetrado en el segundo medio siguiendo una direccion tal que las perpendiculares ID, GM se hallen en la misma relacion que las velocidades de la luz en los dos medios, producirán luz por efecto de su reunion. Ahora bien, ID es el seno del ángulo de reflexion, GM lo es del de refraccion, y se ve que su relacion es constante en la teoría de las ondas: es la misma ley de la refraccion segun resulta de la observacion.

En esto tambien va Fresnel más adelante de lo que iba Huygens, pues no se limita á demostrar que la onda incidente y la refractada tienen direcciones angulares cuyos senos varian en relacion constante, sino que basándose en el principio de la interferencia, hace ver que dos rayos como G*k* y D*l* no estarán ya de acuerdo cuando siguen otra direccion cualquiera, pues cuando el uno parte del punto D, el otro no ha llegado todavía á *m*, hay discordancia, y como siempre se puede tomar dos rayos inmediatos de tal género que su diferencia de marcha sea una semi-ondulacion, resulta necesariamente que ambos interfieren y se destruyen y que no hay ya luz propagada en su direccion.

Así pues, la teoría de las ondas da perfectamente cuenta de las leyes de la reflexion y de la refraccion sin necesidad de que intervenga más hipótesis que la de la constitucion misma de las ondulaciones que suscitan en el seno de un medio eminentemente elástico las vibraciones periódicas de las moléculas de los focos luminosos.

Este es el momento oportuno para insistir en un punto capital que establece una radical diferencia entre la teoría de la emision y la de las ondas. Al explicar Newton la refraccion diciendo que consistia en una atraccion que los medios densos ejercen sobre las moléculas de la luz, se vió obligado á admitir que la velocidad de propagacion de la luz es mayor en dichos medios, y por consiguiente en el agua deberia ser dicha propagacion más rápida que en el aire. En la teoría de las ondulaciones, es enteramente contraria, como acabamos de ver. Refiriéndonos á la figura 145, las líneas ID y GM, que representan los senos de los ángulos de incidencia y de refraccion, expresan tambien las velocidades relativas de la luz en el primero y en el segundo medio. Pues bien, si este último es el más refringente, por ejemplo, si los rayos refractados se aproximan á la perpendicular, es evidente que GM es menor que ID; en otros términos, que la luz se propaga con ménos velocidad en el medio más refringente.

La experiencia se ha pronunciado por este punto decisivo. Ya hemos hecho mencion de los resultados obtenidos separadamente por Foucault y por Fizeau y que prueban que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire.

Así pues, la teoría de la emision está por este concepto en abierta contradiccion con la práctica. Más adelante encontraremos otro testimonio de su impotencia para explicar ciertos fenómenos que la teoría de las ondas explica en cambio victoriosamente.

# CAPITULO XIII

## DOBLE REFRACCION DE LA LUZ

### I

### FENÓMENOS DE DÒBLE REFRACCIÒN EN LOS CRISTALES DE UN EJE

Examinando Erasmo Bartholin, sabio médico danés que vivia en Copenhague á mediados del siglo XVII, ciertos cristales que un amigo suyo le habia llevado de Islandia, se quedó muy sorprendido al ver que los objetos parecian duplicados cuando se los observaba al través de ellos. En 1669 advirtió tan singular fenómeno y describió en una Memoria especial todas sus circunstancias. Veinte años despues, Huygens se dedicaba de nuevo al estudio de lo que luégo se ha llamado *doble refraccion*, formulaba sus leyes, y establecia su teoría con arreglo á los principios del sistema de las ondulaciones, cuyos primeros cimientos habia echado aquel grande hombre.

Desde el descubrimiento de Bartholin y las observaciones de Huygens (que reconoció la misma propiedad en el cuarzo) se han estudiado en todas sus fases los fenómenos de igual índole, formando hoy su conjunto toda una rama de la óptica. Antes de describir los principales, recordemos lo que ocurre cuando cae un haz de luz sobre la superficie de un medio trasparente como el agua ó el vidrio.

Al llegar á la superficie, una parte del haz luminoso se refleja con regularidad, de modo que da una imágen del objeto del que emana, y otra porcion se refleja irregularmente en todos sentidos. Esto, en cuanto á la luz que vuelve sobre su paso, ó si se quiere, que cambia de curso sin cambiar de medio. La otra parte del rayo de luz penetra en la sustancia trasparente, en la que se propaga sin variar de direccion si la incidencia es normal, ó donde se refracta, es decir se desvia, si el rayo cae oblicuamente sobre la superficie. Pero en ambos casos, el rayo continúa siendo simple, y lo es tambien cuando sale del medio trasparente, de suerte que el ojo que lo recibe ve una sola imágen del foco luminoso. A pesar de esto, no siempre sucede todo del modo descrito. Hay sustancias á través de las cuales procede un rayo de otra manera, pues se duplica y presenta, como Bartholin lo indicó por vez primera, dos imágenes del objeto en vez de una sola.

En los filones, en las calizas metamórficas y en las arcillas compactas se encuentra un mineral que cristaliza en romboedros sólidos de seis caras paralelógramas, muy trasparente, in-

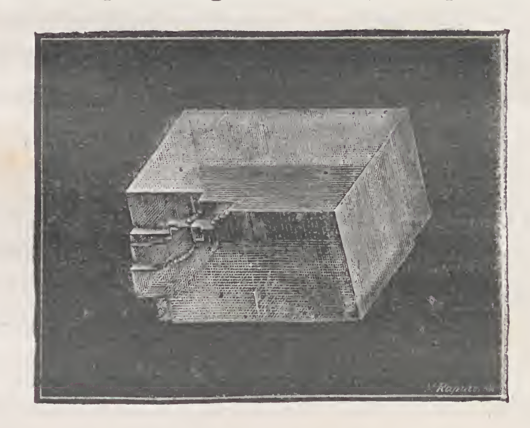


*Fig. 146.*—Fragmento de espato de Islandia

coloro, y cuya composicion química le da á conocer como carbonato de cal con algunas partes de protóxido de manganeso. Los ejemplares más hermosos, que á veces tienen hasta diez centímetros de espesor, proceden de Islandia, por cuya razon se conoce el mineral de que hablamos con el nombre de *cristal ó espato de Islandia* (fig. 146).

Los cristales de esta clase se exfolian con la mayor facilidad en todas sus caras, de suerte que se les puede dar una forma rigurosamente geométrica, más cómoda para el estudio de sus propiedades ópticas, y entónces el romboedro se compone de seis losanjes iguales entre sí.

Cada uno de estos losanjes tiene dos ángulos obtusos de 101° 55′ y dos agudos de 78° 5′. Seis de los ocho ángulos sólidos que forman los vértices del cristal, se componen de otro

ángulo obtuso y de dos agudos: los otros dos de tres obtusos. Supongamos que se enlacen estos últimos con una recta; esta diagonal del romboedro es de gran importancia por lo que respecta á los fenómenos de que vamos á ocuparnos, y se llama *eje óptico* del cristal, por la causa que muy en breve veremos. (1)

Describamos ahora los fenómenos de doble refraccion, conforme se los puede observar fácilmente con un trozo de espato de Islandia. Cojamos un pedazo de este cristal, pongámosle sobre una línea escrita ó impresa y mirando á través de él seremos testigos del fenómeno que tanto llamó la atencion de Bartholin: cada letra se habrá duplicado. Notemos además que cada imágen aislada es ménos negra que la letra misma; que ha tomado un color ceniciento, y que lo que prueba que esto no




*Fig. 147.*—Imágenes dobles de objetos vistos al través de un cristal de espato de Islandia

depende de la absorcion de la luz por el cristal, es que dicho color se presenta negro allí donde están superpuestas las dos imágenes. Hasta las aristas del cristal vistas por refraccion parecen dobles, y una línea trazada en el papel se divide en otras dos paralelas. Dirijamos un haz de luz solar sobre una de las caras; el rayo luminoso sale duplicado y forma en una pantalla dos imágenes diferentes, cuya distancia depende de la inclinacion del rayo incidente sobre la cara del cristal.

Prosigamos adelante en el análisis del fenómeno, y para ello simplifiquemos el experimento, es decir, no examinemos más que un punto á la vez. Este punto, visto al través del cristal, parece doble. Demos al cristal una vuelta sobre sí mismo, en sentido paralelo á las caras de incidencia y de emergencia. ¿Qué veremos entónces?

Una de las imágenes gira alrededor de la otra, y cuando el cristal ha descrito una circunferencia entera, la imágen vuelve á colocarse en su posicion primitiva, despues de describir un círculo alrededor de la otra imágen inmóvil.

Cuando en vez de observar un punto se observa una línea recta, se advierte que, en dos posiciones diferentes del cristal, una de las líneas, que parece moverse paralelamente á la otra, llega á una desviacion máxima; y que en otras dos posiciones, las imágenes parecen coincidir, coincidencia que es tan sólo aparente, porque si se ha marcado un punto en la línea observada, se ve la doble imágen de este punto, áun cuando las imágenes paralelas de las líneas estén superpuestas. En este caso como en el precedente, se verifica la rotacion de una de las imágenes alrededor de la otra.

Digamos desde luégo que se da el nombre de imágen *ordinaria* á la imágen inmóvil, y el de imágen *extraordinaria* á la que ejecuta su rotacion alrededor de la primera. La razon de esto está en que el rayo refractado que produce la imágen inmóvil, sigue en su camino las leyes de la refraccion simple, tales cuales las han formulado Snelio y Descartes, al paso que

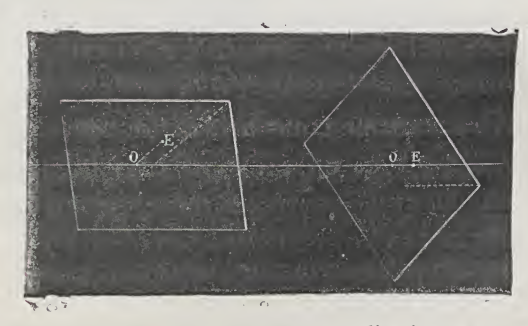



*Fig. 148.*—Posiciones de la imágen extraordinaria con respecto al plano de incidencia. Seccion principal

(1) No se debe considerar el eje óptico como una línea única. En un cristal hay tantos ejes que gozan de esta misma propiedad como líneas paralelas á la direccion de la diagonal del romboedro. En otros términos, aquí *eje* es sinónimo de direccion, y si se dice del espato de Islandia que es un *cristal de un eje*, consiste en que sólo hay una direccion respecto de la cual sea exacta la definicion anterior.

el otro rayo no obedece á las mismas leyes (1). Esta diferencia característica de las dos imágenes se puede poner en evidencia de muchos

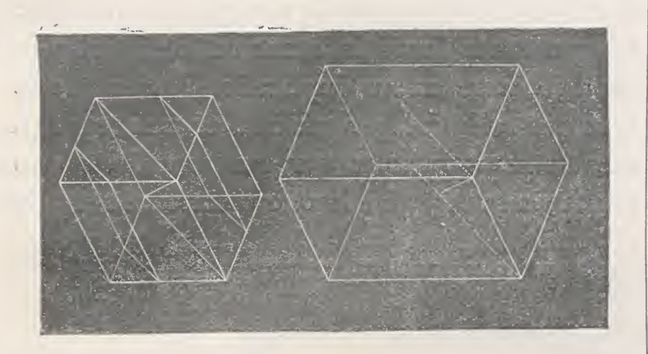


*Fig. 149.*—Secciones principales y eje óptico del espato de Islandia

modos. Hágase caer un rayo de luz perpendicularmente á una de las caras del cristal, y se bifurcará al penetrar en el interior; pero uno de los rayos seguirá la direccion del incidente y tampoco se refractará á su emergencia: este es el rayo ordinario, el que obedece á la ley de Descartes. El otro rayo se desviará de la direccion del incidente, á su entrada en el cristal y á su salida; es el rayo que producirá la imágen extraordinaria.

Cuando la incidencia es oblicua, los dos rayos se refractan; pero el ordinario se desvia tambien, cualquiera que sea la posicion del cristal, con tal que las caras de incidencia y de emergencia conserven una direccion paralela á la primitiva; en una palabra, su curso es el que seguiria al través de un pedazo de cristal de caras paralelas. No sucede lo propio con el otro rayo, con el que motiva la imágen extraordinaria, puesto que, segun hemos visto, esta imágen gira alrededor de la primera, si se da vueltas al cristal paralelamente á sí mismo.

En este movimiento de la imágen extraordinaria ocurre una circunstancia que conviene notar. Puesto el cristal sobre una hoja de papel en la cual se haya marcado un punto, supongamos el ojo colocado en el plano de incidencia. El rayo refractado ordinario estará tambien en este plano, como lo indica la ley de simple refraccion, y la imágen ordinaria O del punto se hallará en la línea II del plano de incidencia con el papel (fig. 149). Pero no sucederá así con la imágen extraordinaria E, y la línea que reune las dos imágenes formará un ángulo con la II mencionada. Pero se observa que dicha línea OE continúa siempre paralela, durante el movimiento de rotacion del cristal, á la bisectriz AD del ángulo obtuso de la cara paralela al plano del papel. Así es que cuando, á causa de dichos movimientos, la bisectriz se ha colocado paralelamente á II, la imágen extraordinaria misma se halla en esta línea, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia.

Así pues, entre las secciones que cortan el cristal perpendicularmente á una de sus caras, hay otra seccion tal, que si el rayo incidente está contenido en ella, el extraordinario obedecerá á la primera ley de simple refraccion, exactamente como el otro rayo. Dase á este plano el nombre de *seccion principal*. Todo plano perpendicular á una de las caras del espato de Islandia, y paralelo á la pequeña diagonal del losanje, ó á la bisectriz del ángulo obtuso, es una seccion principal de esta cara.

Toda seccion principal es paralela al eje óptico, y esta condicion basta; de suerte que si se cortase una cara artificial en el cristal, cualquier plano trazado perpendicularmente á esta cara y paralelo al eje óptico seria tambien una seccion principal de la cara artificial. Por último, si se corta una cara artificial ABC perpendicular al eje óptico NI, todo rayo que caiga

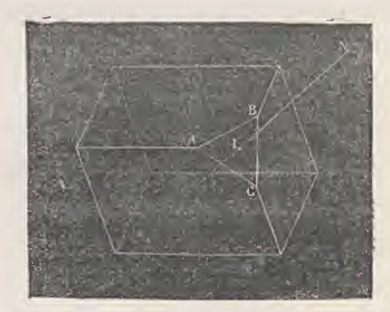



*Fig. 150.*—Seccion artificial perpendicular al eje óptico

en ella estará forzosamente en una seccion principal, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia. En este caso, la observacion hace ver que si el rayo incidente es normal á la cara artificial, no hay más que un rayo refractado. Tenemos pues una direccion en la cual desaparece el fenómeno de la bifurcacion; no ocurriendo tampoco la doble refraccion cuan-

(1) En una palabra, por una parte, el rayo refractado extraordinario no se halla por lo comun en el plano de incidencia; y por otra, la relacion de los senos de los ángulos de incidencia y de refraccion no permanece constante.

do el rayo incidente cae paralelamente al eje óptico.

Monge ha hecho un experimento singular, de muy fácil reproduccion y que demuestra cuál es la marcha seguida en el cristal por los haces emanados de un punto luminoso para producir las dos imágenes ordinaria y extraordinaria del punto. Examinando la doble imágen de un punto S (fig. 151), situado á alguna distancia de la cara inferior, y pasando por debajo de esta cara una cartulina opaca *ab*, reconoció con sorpresa que la imágen más distante de la cartulina es la primera que desaparece. Hé aquí cómo se explica este fenómeno. Un haz luminoso incidente SI se bifurca y da dos haces refractados, y por lo tanto produce, á la salida de la cara paralela, dos haces emergentes que divergen, y uno solo de los cuales puede penetrar en el ojo: supongamos que este sea el que produce la imágen ordinaria O. Otro haz incidente, inmediato al primero, dará tambien dos haces emergentes, uno de los cuales penetrará en el ojo y producirá la imágen extraordinaria E. Como las caras del cristal son paralelas, cada haz emergente se compone de rayos paralelos á los del rayo incidente. Por consiguiente, puesto que los que producen las imágenes van á encontrarse en el ojo, es preciso que los haces refractados correspondientes se crucen en el cristal.

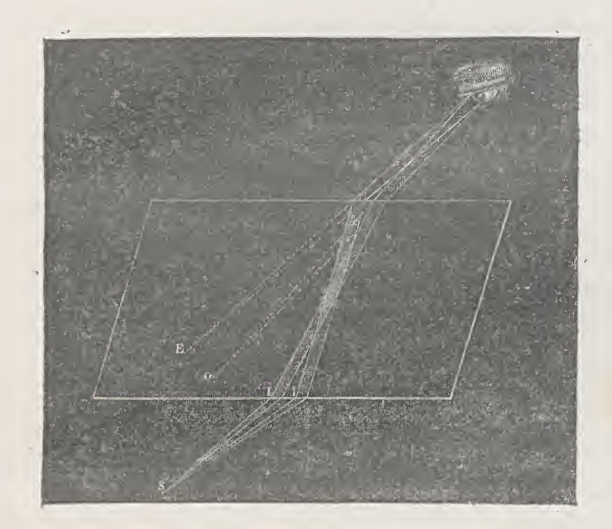



*Fig. 151.*—Cruzamiento de los haces luminosos que producen la imágen ordinaria y la extraordinaria

Así se explica el experimento de Monge; la cartulina *ab* empieza por interceptar el haz que produce la imágen más distante, y por lo tanto esta imágen, es decir, la extraordinaria E es naturalmente la primera que debe desaparecer.

Tales son las circunstancias más notables que constituyen el fenómeno de la doble refraccion. Las leyes que rigen este fenómeno son demasiado complejas para que podamos explicarlas en una obra tan elemental como el *Mundo físico;* pero trataremos de dar en breves líneas una idea de la diferencia que existe entre la simple y la doble refraccion.

Hemos dicho ya que el haz ordinario sigue las dos leyes de Descartes; es decir que el rayo refractado está siempre en el plano de incidencia, y que si se hace variar el ángulo de incidencia, la relacion que existe entre su seno y el del ángulo de refraccion es siempre constante. El haz extraordinario no sigue la primera de estas leyes sino cuando el rayo incidente está en una seccion principal. Tampoco sigue en modo alguno la segunda, de suerte que la relacion de los senos, lo que se llama índice de refraccion, varía segun el ángulo que el rayo incidente forma con el eje óptico del cristal. Si este ángulo es nulo, ó si el haz incidente es paralelo al eje óptico, la doble refraccion desaparecerá en estos casos solamente; una de las imágenes se confunde con la otra, habiendo igualdad entre los índices ordinario y extraordinario de refraccion. Cuanto mayor es el ángulo, más va creciendo la desigualdad de estos índices, llegando á su máximum cuando el haz incidente tiene una direccion perpendicular al eje óptico. En el espato de Islandia, único cristal dotado de la doble refraccion que hemos examinado hasta aquí, el índice de refraccion del rayo ordinario es mayor que el del rayo extraordinario. Lo contrario acontece si se consideran ciertas sustancias birefringentes, por ejemplo, el cristal de roca. ¿De qué dimana esta diferencia? Para exponer su causa, seria preciso desarrollar la teoría entera de la refrac-

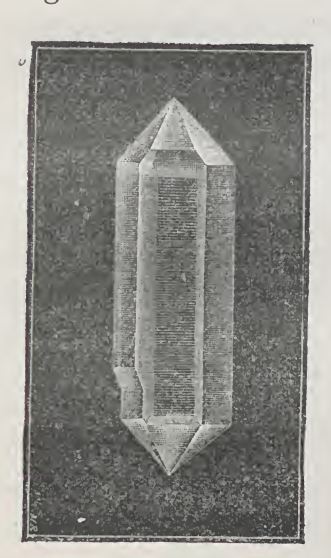


*Fig. 152*—Cristal de roca

cion simple y doble en el sistema de las ondulaciones; demostrar que la refraccion tiene por orígen la diferencia de velocidad que experimentan las ondas de éter al pasar de un medio á otro más refringente; que el rayo ordinario procede como si se moviese en un medio homogéneo no cristalizado, al paso que el extraordinario se propaga con más ó ménos facilidad segun que se mueva en esta ó en la otra direccion relativamente á la orientacion de las moléculas cristalinas. En el espato de Islandia, el rayo extraordinario es el dotado de mayor velocidad, sucediendo lo contrario en el cristal de roca.

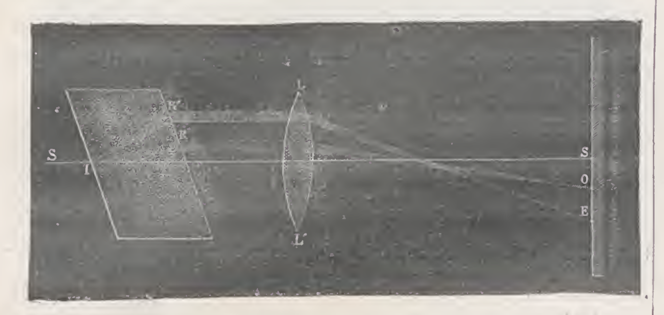



*Fig. 153.*—Propagacion de las imágenes ordinaria y extraordinaria de un cristal birefringente. Igualdad de intensidad

De aquí proceden los nombres de cristales *positivos* y cristales *negativos* dados á las sustancias dotadas de doble refraccion, segun que se las clasifique en la una ó en la otra categoría, teniendo las primeras por tipo el cristal de roca, y las segundas el espato de Islandia.

La turmalina, el rubí y la esmeralda son cristales negativos; el cuarzo—nombre mineralógico del cristal de roca,—el sulfato de potasa y de hierro, el hiposulfato de cal y el hielo figuran en el número de los cristales positivos.

## II

### DOBLE REFRACCION EN LOS CRISTALES DE DOS EJES

Prodúcese tambien la doble refraccion en toda una clase de sustancias cristalinas, designadas con el nombre de *cristales de dos ejes.* El topacio, la aragonita, el sulfato de cal, el talco, el feldespato, la perla y el azúcar son cristales de dos ejes: en cada cristal de esta clase hay dos direcciones distintas por las cuales pasa el rayo sin bifurcarse; estas dos direcciones son los *ejes ópticos* del cristal. Pero hay una diferencia esencial entre los fenómenos de doble refraccion en los cristales de un eje y los de los cristales de dos ejes. En los primeros, uno de los dos rayos refractados sigue las leyes de la refraccion simple; en los segundos los dos rayos son extraordinarios: ninguno de ellos sigue la ley de Descartes. Un experimento de Fresnel lo demuestra así sencillamente. Se divide un topacio en muchos fragmentos, cada uno de estos con la forma de láminas de caras paralelas, pero tallados en diferentes sentidos; y despues de pegar dichos fragmentos por sus caras planas, se da al conjunto la forma de un paralelepípedo. Mirando entónces al través de él una línea recta paralela á la arista refringente, se ven dos imágenes de la línea, cada una de las cuales es una mixta cuyas diversas partes corresponden á los fragmentos del topacio; ahora bien, si uno de los sistemas de rayos refractados siguiese las leyes de Descartes, la imágen que resultaria seria una línea recta, porque la direccion de los rayos en el prisma seria entónces independiente de la direccion de los ejes ópticos en cada pedazo de los que le componen. La experiencia prueba, pues, que los dos rayos son extraordinarios. En breve veremos (artículo III del capítulo XIV) otro medio de distinguir los cristales de uno y de dos ejes.

Terminemos lo que teníamos que decir acerca de la doble refraccion enumerando los medios refringentes en que no se presenta esta clase de fenómenos, ó que están dotados de la refraccion simple. Estos medios son ante todo los gases, los vapores y los líquidos: y entre las sustancias que han pasado del estado líquido al sólido, aquellas cuyas moléculas no han adquirido una estructura cristalina regular, como por ejemplo, el cristal, la cola, la goma y las resinas; por último, los cristales cuya forma primitiva es el cubo, el octaedro regular y el dodecaedro romboidal. Debemos añadir que los cuerpos pertenecientes á estas dos últimas categorías pueden adquirir la propiedad de la refraccion doble cuando se los somete á compresiones ó á dilataciones violentas, ó bien cuando se calientan desigualmente sus diferentes partes.

Ciertos sólidos pertenecientes al reino vegetal ó al reino animal, como el asta, la pluma y el nácar, están tambien dotados de doble refraccion.

# CAPITULO XIV

## POLARIZACION DE LA LUZ

### I

#### POLARIZACION DE LA LUZ POR DOBLE REFRACCION

Cuando se observa un objeto luminoso al través de un cristal dotado de doble refraccion, verbigracia, de un romboedro de espato de Islandia, se ven, segun ya sabemos, dos imágenes distintas, una llamada ordinaria, que sigue las leyes de la refraccion simple, y otra extraordinaria, cuyas propiedades hemos indicado en los artículos anteriores. Reconócese fácilmente esta última en que gira alrededor de la otra cuando se imprime al cristal un movimiento de rotacion en un plano paralelo á las caras de incidencia y de emergencia de los rayos. Ahora importa observar que, en todas estas posiciones, no varía la intensidad relativa de las dos imágenes; el brillo de cada una es la mitad ménos que el del objeto luminoso, como es fácil comprobarlo observándolo directamente. Supongamos que se examina un circulito blanco sobre fondo negro. Donde quiera que las dos imágenes ordinaria y extraordinaria del punto están separadas, presentan una tinta cenicienta de igual intensidad, y el brillo es igual al del objeto allí donde ambas imágenes se sobreponen. Por último, ocurre siempre el mismo fenómeno, cualesquiera que sean los colores respectivos del objeto y del fondo.

Hácese tambien el mismo experimento en las cátedras, dejando llegar un haz de luz al cristal y recibiendo los dos haces refractados en una lente convergente: las dos imágenes se proyectan en una pantalla (fig. 153). Si se da entónces vuelta al cristal paralelamente á la cara de incidencia, las dos imágenes se separan describiendo cada cual una circunferencia, y se ve que en cualquier posicion su intensidad luminosa es igual. Si se hace de modo que las dos imágenes se sobrepongan en parte, el brillo de las porciones sobrepuestas será doble del que tienen las separadas, como se ve en la figura 154.

Un bonito y antiguo experimento hecho por Huygens nos probará que los haces luminosos que salen del espato de Islandia adquieren nuevas y notables propiedades despues de la desviacion en el medio cristalizado, propiedades que no tenia el haz luminoso ántes de pasar por el cristal. Este experimento consiste en recibir en un segundo cristal los rayos ordinario y extraordinario despues de su salida del primer romboedro, y en examinar las intensidades relativas de las imágenes que de ello resultan cuando se varía la orientacion del segundo cristal alrededor del haz emergente. El medio más sencillo de observar los fenómenos que entónces ocurren, medio empleado por el mismo Huygens, es el siguiente:

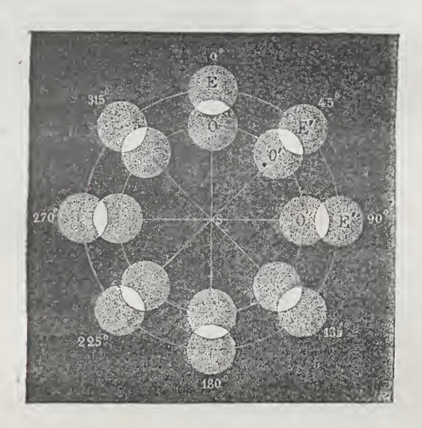



*Fig. 154.*—Igualdad de la intensidad de las imágenes ordinaria y extraordinaria en la doble refraccion

Coloquemos un primer cristal sobre un punto negro en medio de un fondo blanco, y veremos dos imágenes de igual intensidad. Pongamos ahora otro espato de Islandia sobre el primero, y de tal modo que sus secciones principales coincidan; uno de los medios de realizar esta condicion consiste en colocar las caras del uno paralelamente á las del otro; y siempre

resultarán dos imágenes, de la misma intensidad que ántes; sólo que estarán más separadas que con un solo cristal. Lo propio sucederia, áun cuando las dos caras de los cristales puestas frente á frente no conservasen su paralelismo, con tal que las secciones principales de los dos romboedros continuaran en el mismo plano ó en planos paralelos; no siendo tampoco necesario que, en la primera posicion, dichos romboedros se toquen.

Tenemos ya una diferencia entre el rayo luminoso ántes de su refraccion en el espato de Islandia y cada rayo emergente ordinario ó extraordinario, pues al paso que el primero se bifurca al penetrar en el cristal, parece que cada uno de los otros dos sigue siendo simple cuando penetra en el segundo cristal. Prosigamos nuestro estudio.

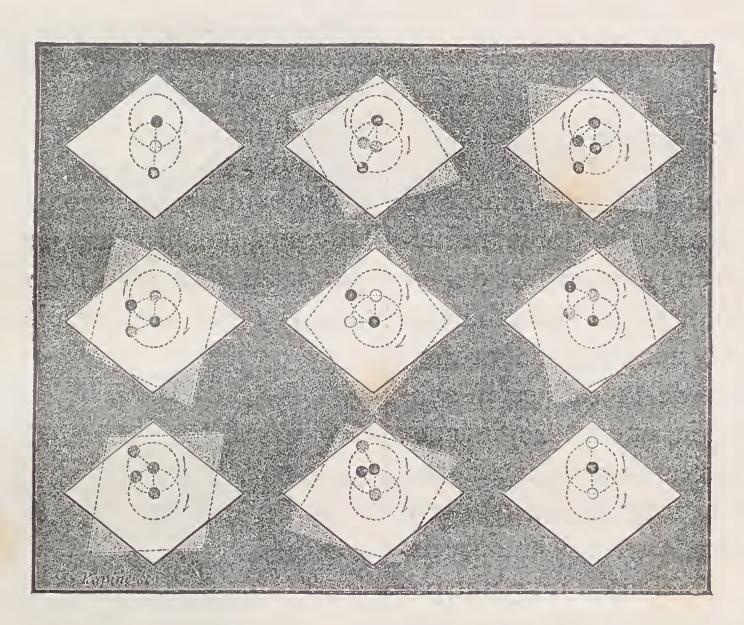


*Fig. 155.*—Experimento de Huygens. Variaciones de intensidad de imágenes procedentes de dos haces polarizados por doble refraccion

Hagamos ahora girar lentamente el cristal superior, de modo que la seccion principal forme con la del primero ángulos cada vez mayores. Entónces se verán aparecer cuatro imágenes: cada una de las dos primeras se duplicará, pero sin conservar la igualdad de intensidad que caracterizaba á éstas. De dichas cuatro imágenes, situadas en los vértices de un losanje de lados constantes, pero de ángulos variables, dos proceden de la doble refraccion del rayo ordinario que sale del cristal superior; las otras dos de la doble refraccion del rayo extraordinario. Pero hay una diferencia importante y es que por lo regular cada par se caracteriza por cierta diferencia en la intensidad luminosa de las imágenes. La figura 155 representa sus posiciones y sus intensidades relativas con respecto á los ángulos, comprendidos entre 0° y 180°, de las secciones principales de los dos cristales. Si estas secciones son de ángulo recto, no se ven más que dos imágenes; si lo forman de 180°, sucede otro tanto á ménos que las dos imágenes se sobrepongan por ser los cristales del mismo espesor; en este último caso, efectuándose en opuesto sentido las desviaciones operadas con cada cristal, no aparece más que una sola imágen.

Resulta ya de este primer experimento que todo rayo de luz que ha atravesado un cristal dotado de doble refraccion, no disfruta, despues de su paso, de las mismas propiedades en todos sentidos; pues en ciertas direcciones no es ya susceptible de sufrir otra bifurcacion, y en otras, los dos haces en que se divide no poseen la misma intensidad luminosa. Para caracterizar estas nuevas propiedades, se dice que la luz que ha atravesado un cristal birenfringente es *luz polarizada* (1).

---

(1) Malus fué quien «dió el nombre de *polarizacion* á esta singular modificacion de la luz, en virtud de una hipótesis que habia ideado Newton para explicar el fenómeno: este gran geómetra suponia que las moléculas luminosas tienen dos clases de polos, ó más bien de caras, que gozaban de distintas propiedades físicas; que en la luz ordinaria, las caras de igual especie de las varias moléculas luminosas están vueltas en todas direcciones, pero que por la accion del cristal unas se dirigen paralela y otras perpendicularmente á su seccion principal, y que el género de refraccion que experimentan las moléculas luminosas depende de la direccion que tienen sus caras relativamente á la seccion principal». (Fresnel.)

Pero importa mucho precisar los fenómenos que acabamos de describir. Para ello, supongamos que se haga llegar á un cristal de espato islándico cuya seccion principal es vertical, un haz de luz SI (fig. 156). Este haz se divide en el plano de la seccion en dos haces, uno ordinario IR, y otro extraordinario IR'. Interceptemos uno de ambos con una pantalla y dejemos pasar el otro al través de un segundo espato de Islandia: al atravesarlo, el haz luminoso experimentará las más de las veces la doble refraccion, se dividirá en dos haces $I'_1R_1$ que es el ordinario é $I'_1R'_1$, que es el extraordinario, Finalmente, por medio de una lente proyectemos los haces emergentes en una pantalla. Veamos qué sucederá si se gira el segundo cristal de modo que se haga formar á su seccion principal todos los ángulos posibles con la del primero, de 0° á 360°. La figura 157 muestra cuáles son las intensidades relativas de las dos imágenes, si el rayo emergente del primer cristal es el que ha atravesado el segundo; la figura 158 muestra por el contrario lo que son estas intensidades cuando se hace pasar al segundo espato islándico el rayo extraordinario salido del primero.

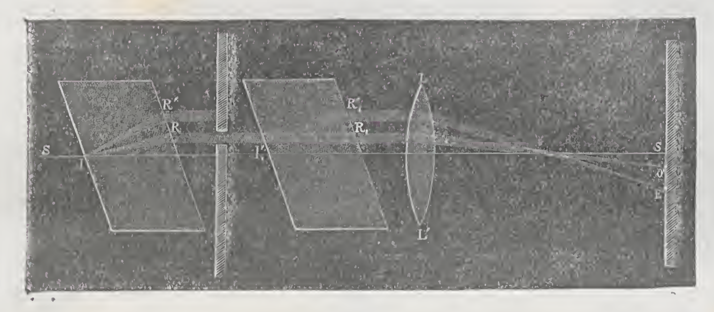


*Fig. 156.*—Polarizacion del rayo ordinario por doble refraccion

En resúmen, un haz de luz natural ha penetrado en el primer espato de Islandia donde sufre la doble refraccion, y cada uno de los haces que sale de él tiene propiedades particulares que se caracterizan diciendo que se ha *polarizado*, por cuya causa el primer cristal recibe el nombre de *polarizador:* el segundo cristal ha servido para analizar las propiedades que la polarizacion ha hecho adquirir á cada haz: es el cristal *analizador*.

Al pasar el rayo *ordinario* al analizador se divide en dos rayos cuya intensidad varía segun el ángulo que forma la seccion principal del segundo cristal con la del primero y que da dos imágenes, una ordinaria y otra extraordinaria. Si este ángulo es de 0° ó de 180°, la imágen ordinaria es la única que existe con su intensidad máxima, pues la extraordinaria ha desaparecido; si es de 90° ó 360°, la imágen extraordinaria tiene su mayor brillo, por haber desaparecido la otra. En posiciones intermedias en que la segunda seccion principal forma con la primera ángulos de 45°, las dos imágenes tienen la misma intensidad. Por último, en las demás posiciones relativas de las secciones principales de los cristales hay desigual intensidad en una ú otra imágen y entónces se dice que el rayo ordinario se ha *polarizado* en el plano de la seccion principal, dándose á éste el nombre de *plano de polarizacion*. Ahora, como el segundo rayo, el extraordinario, experimenta las mismas modificaciones al pasar al analizador, con la diferencia esencial de que siempre hay una de 90 grados en las posiciones relativas de las secciones principales, dícese que está *polarizado* en un plano perpendicular al primer plano de polarizacion. El plano de polarizacion forma un ángulo recto con la seccion principal del cristal polarizador. En una palabra, los dos rayos, el ordinario y el extraordinario, procedentes de un rayo de luz natural que ha sufrido una doble refraccion, se *polarizan en ángulo recto*.

Del mismo modo se verifica en todos los cristales birefringentes la polarizacion por reflexion, tal como acabamos de estudiarla en el espato de Islandia; pero no es siempre fácil observarla á causa de la escasa separacion de los haces ordinarios y extraordinarios. Aun con el espato mismo, se requieren cristales de cierto espesor para que sea fácil interceptar uno de ellos con una pantalla. Así es que para conseguir esta separacion de los haces polarizados, se han ideado aparatos más cómodos, de los cuales describiremos el *prisma de Nicol*.

Este prisma consiste en un largo cristal de espato de Islandia cortado en dos por un plano perpendicular á la seccion principal: los dos fragmentos, puestos de nuevo en su posicion primitiva, se pegan con bálsamo del Canadá. Como el índice de refraccion de esta sustancia es menor que el del rayo ordinario del espato y mayor que el del extraordinario, síguese de aquí, conforme se demuestra rigurosamente y la experiencia lo confirma, que si un rayo de luz penetra en el sentido de la longitud del cristal y se divide allí en dos por efecto de la doble refraccion, el rayo ordinario experimenta la reflexion total en la superficie del bálsamo del Canadá, miéntras que el extraordinario pasa sólo por la segunda mitad del cristal y sale por la cara opuesta.

Supongamos que se empleen dos prismas de Nicol para reproducir el experimento de Huygens: claro está que nunca se obtendrán más que dos imágenes, ó sea las que provienen del rayo emergente, es decir, del rayo extraordinario polarizado por el primer prisma. Si las secciones principales de los dos prismas son paralelas, una de las dos imágenes, la ordinaria, desaparece; la otra, la extraordinaria, presenta su brillo máximo; si dichas secciones están en ángulo recto, ambas imágenes desaparecen, por cuanto la ordinaria, que deberia tener su máximum de intensidad, sufre la reflexion total, y la intensidad de la extraordinaria es nula. El primer prisma, el que recibe el rayo de luz natural, es el *nicol polarizador*, y el otro el *nicol analizador*.

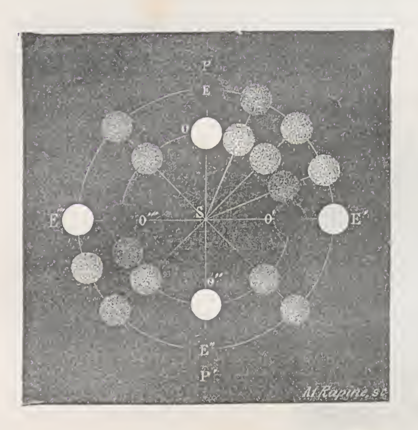


*Fig. 157.*—Desdoblamiento del rayo ordinario. Intensidades variables de las imágenes del haz polarizado

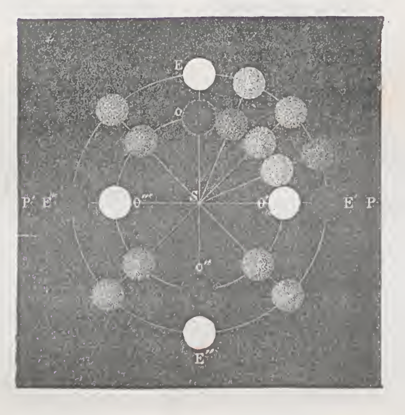


*Fig. 158.*—Desdoblamiento del rayo extraordinario. Intensidades de las imágenes del haz polarizado



*Fig. 159.*—Turmalina de Siberia

Hay un cristal natural que posee la propiedad del prisma de Nicol, de no dar paso al rayo extraordinario; este cristal es la turmalina que cuando tiene cierto espesor absorbe fuertemente el rayo ordinario. Biot descubrió en 1815 tan notable propiedad, que nos permitirá presentar, tomándolo de J. Herschel, un nuevo ejemplo de polarizacion de la luz por doble refraccion.

«Cuando se exfolia con una rueda de lapidario un prisma de turmalina desprendiendo de él hojas ó láminas paralelas al eje y de un espesor uniforme como de un vigésimo de pulgada ($1^{mm}\,27$), se da á estas láminas el pulimento conveniente. Entónces aparecen al través de ellas los objetos luminosos como si se los mirara con un cristal de color. Supongamos una de estas láminas interpuesta perpendicularmente entre el ojo y una bujía: se verá á ésta con igual facilidad en todas las posiciones del eje de la lámina relativamente al horizonte. Si se da vuelta á la lámina en su propio plano, no se nota cambio alguno en la imágen de la vela. Dando entónces á dicha lámina una posicion fija (por ejemplo, colocando su eje verticalmente), se interpondrá entre ella y el ojo otra lámina á la que se hará girar poco á poco en su propio plano, lo cual producirá un fenómeno muy curioso. La bujía será sucesivamente visible é invisible á cada cuarto de revolucion de la lámina, pasando por todos los grados de claridad, desde cierto máximum hasta una oscuridad total ó casi total, despues de la cual la claridad aumentará del propio modo que haya disminuido. Ahora bien, si se mira con atencion la posicion de la segunda lámina con relacion á la primera, se verá que los máximos de claridad ocurren cuando los ejes son paralelos, es decir cuando están dispuestos como lo estaban

ordinariamente en el cristal, ó cuando entre sus posiciones media una diferencia de 180°. Por el contrario, los mínimos ocurren cuando los ejes se cruzan exactamente en ángulos rectos. En esta posicion, la luz se detiene totalmente si la turmalina es de buen color, y áun cuando cada lámina en particular sea de perfecta trasparencia, su combinacion es enteramente opaca.» (Herschel, *La Luz.*)

Como se ve, el haz de luz natural que ha atravesado una lámina de turmalina se polariza, como el que emerge de un cristal de espato de Islandia. Por consiguiente, no tiene en todas sus partes, en todas sus caras, si podemos expresarnos así, las mismas propiedades, á lo ménos por lo que respecta á su brillo. Vamos ahora á ver que la doble refraccion no es el único medio de trasformar la luz natural en luz polarizada.

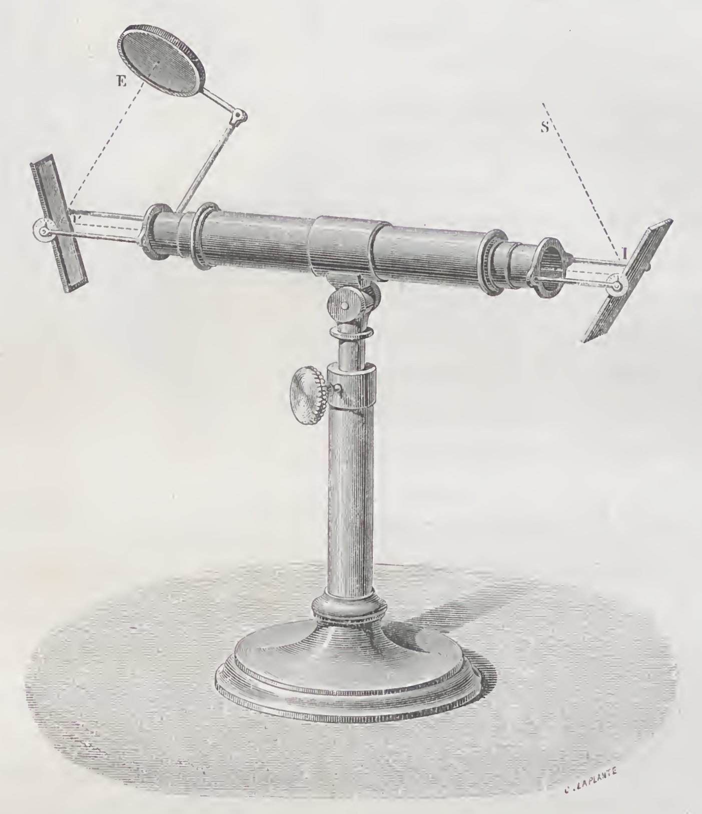



*Fig. 160.*—Polariscopio de Malus perfeccionado por Biot

## II

### POLARIZACION POR REFLEXION

El físico francés Malus, que tanta celebridad adquirió por sus notables trabajos sobre óptica, contemplaba por casualidad cierto dia de 1808, á través de un cristal de espato de Islandia, la imágen del sol poniente reflejada en las vidrieras del palacio del Luxemburgo, cuando notó con sorpresa que haciendo girar el prisma, las dos imágenes cambiaban de intensidad; la más refractada era alternativamente más ó ménos brillante que la otra á cada cuarto de revolucion. Analizando minuciosamente este fenómeno descubrió que basta la reflexion bajo ciertos ángulos para dar al rayo reflejado las mismas propiedades que posee el rayo que atraviesa un cristal birefringente como el espato de Islandia. El experimento de Huygens, cuya teoría en vano trataron de formular el mismo Huygens y Newton, no fué ya un fenómeno aislado, y esforzándose Malus por relacionarla con una misma explicacion deducida de la teoría de Newton, vino á dar el nombre de polarizacion de la luz á la modificacion sufrida por los rayos luminosos en los experimentos que dejamos mencionados. Tres años despues, en 1811, Malus, Biot y Brewster descubrian cada cual de por sí la polarizacion por refraccion simple, y Arago la cromática, y desde entónces, una multitud de casos nuevos, relativos á ciertas modificaciones singulares de los haces luminosos, contribuyeron, juntamente con los fenómenos susodichos, á formar una de las ramas más

interesantes de la ciencia, tan fecunda por su teoría como por sus aplicaciones prácticas. Como los límites y la naturaleza elemental de esta obra no nos permiten descender á largos detalles, nos limitaremos á describir los más notables de estos fenómenos.

Cuando un haz de luz natural cae oblicuamente sobre un espejo no metálico, de cristal negro, de mármol, de obsidiana, etc., adquiere por la reflexion en la superficie las mismas propiedades que si hubiera sido atravesado por un cristal dotado de doble refraccion: se *polariza.*

Se coloca sobre una mesa, delante de una ventana abierta, una placa de cristal negro, y el observador se sitúa en seguida de modo que reciba oblicuamente, con una inclinacion de 35°, la luz del cielo reflejada por la placa. El brillo de ésta parece entónces uniforme. Si, sin cambiar de posicion, se observa la superficie brillante al través de una lámina de turmalina tallada paralelamente á su eje óptico, y se da vuelta á esta lámina en su propio plano, se notan las variaciones siguientes en el brillo de la imágen de las nubes formada en la placa de cristal: si el eje de la turmalina está en un plano vertical la imágen brillante desaparece; la placa de vidrio parece cubierta de una especie de nube oscura, y el centro de la mancha es enteramente negro. Cuando por el contrario, dicho eje es horizontal,

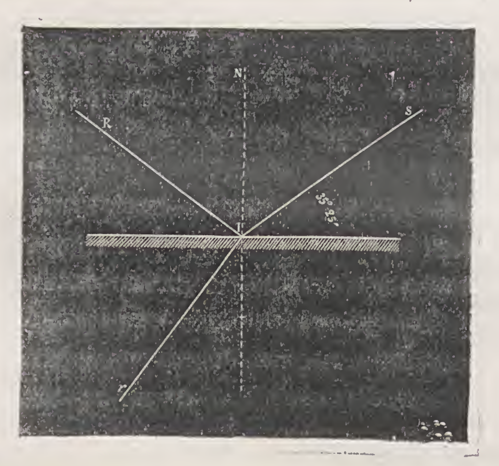



*Fig. 161.*—Relacion entre el rayo polarizado bajo el ángulo de polarizacion de una sustancia y el rayo refractado

es decir, paralelo á la placa de vidrio, la mancha desaparece completamente; por último, en las posiciones intermedias de la turmalina, el brillo de la imágen va aumentando gradualmente de la primera posicion á la segunda.

Si el analizador es un prisma de Nicol en vez de una lámina de turmalina, las variaciones de brillo de la imágen se sucederán del mismo modo, y llegarán á su minimum cuando la seccion principal del prisma sea vertical y á su máximum cuando dicha seccion esté en ángulo recto con la primera de sus posiciones.

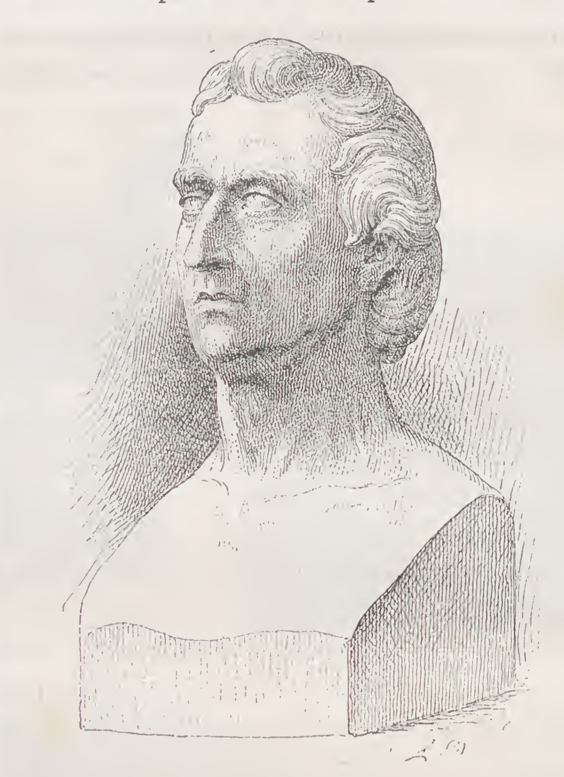


*Fig. 162.*—Francisco Arago

De estos dos experimentos se deduce que todo haz luminoso que caiga con una inclinacion de 35° 25' (ó lo que es lo mismo con una incidencia de 54° 33') sobre una placa de cristal negro, se polariza, despues de su reflexion, en el plano mismo de esta reflexion. Dicho ángulo de 54° 35' es lo que se llama ángulo de polarizacion del cristal; aquel respecto al cual el rayo reflejado puede ser enteramente extinguido por el polariscopio analizador, lo cual se expresa diciendo que el rayo se ha polarizado completamente. Cuando el ángulo de incidencia es de distinto valor, la imágen del haz no se extingue por completo, y el rayo reflejado se polariza parcialmente.

El ángulo de polarizacion varía segun sean las sustancias reflectoras, y es por ejemplo de 52° 45' para el agua, de 56° 3' para la obsidiana, de 58° 40' para el topacio y de 68° 2' para el diamante. Brewster ha ideado un experimento muy curioso para hacer patente la diferencia á que aludimos entre los ángulos de polarizacion de dos sustancias, como por ejem-

plo, el vidrio y el agua. Pone una placa de vidrio de modo que reciba y refleje un haz de luz con una incidencia de 54° 35′, que segun acabamos de decir, es el ángulo de polarizacion de dicha materia; y en seguida observa el haz reflejado




*Fig. 163.*—Colores de la luz polarizada en las láminas tenues

con un analizador de manera que desaparezca toda luz. Si en este momento una persona echa el aliento en la placa de vidrio, la imágen aparece de nuevo. Este fenómeno consiste en que la reflexion se verifica entónces en una capa acuosa, y en que el ángulo de polarizacion del agua no es el mismo que el del vidrio.

Malus ha ideado otro aparato con el cual se pueden estudiar todas las propiedades de la luz polarizada por reflexion. Aparte de las que acabamos de describir, indicaremos tambien las que caracterizan á dicha luz cuando se refleja al caer sobre una segunda placa reflectora. La figura 160 representa el aparato de Malus, modificado y perfeccionado por Biot. I es la placa bruñida destinada á polarizar el rayo de luz SI por su reflexion en la superficie de la placa; en seguida se ve un tubo dado de negro por dentro, provisto de diafragmas y por cuyo eje pasa el rayo reflejado y polarizado II'. Este cae al salir del tubo sobre una placa I' de vidrio negro, se refleja en ella de nuevo, y va á parar al ojo ó á formar una imágen en una patalla E. Los marcos que sostienen las dos placas reflectoras pueden girar al rededor de un eje perpendicular al del tubo, de modo que sus planos formen con este último todos los ángulos posibles; además, se puede dar vuelta á cada placa en una de sus posiciones alrededor del eje mismo del tubo; de suerte que en definitiva, para una incidencia dada del rayo luminoso sobre la primera placa, se puede hacer variar como se quiera el ángulo de incidencia del rayo reflejado sobre la otra placa, y el del segundo plano de reflexion con el primero.

Con este aparato se ve que el máximum de brillo de la imágen se presenta cuando los dos planos de reflexion coinciden, y el mínimum cuando estos planos están en ángulo recto. Además, el rayo se extingue completamente cuando el ángulo de incidencia en cada uno de estos espejos es de 35° 25′, con tal que el haz no sea de gran intensidad, como sucede con la luz solar.

Brewster ha dado ha conocer una ley muy sencilla que existe entre el ángulo de polarizacion y el índice de refraccion de la sustancia que polariza la luz por reflexion, de modo que cuando se conoce uno de estos elementos, es fácil deducir el otro. Esta ley es la expresion de la relacion geométrica siguiente: *El rayo reflejado* IR (fig. 161), *polarizado bajo el ángulo de polarizacion, y el rayo refractado* I*r* *forman un ángulo recto.*

La refraccion simple polariza tambien la luz. Malus, Biot y Brewster lo han descubierto así, cada cual por su parte, en 1811. Se puede comprobar este fenómeno con el aparato de Biot (fig. 160), en el que el cristal I ha sido reemplazado con un prisma de vidrio. Si se da vuelta á éste de modo que el rayo salga perpendicularmente á la cara de emergencia, se ve, girando el analizador I′, que el haz presenta despues de su reflexion máximos y mínimos de intensidad, pero poco marcados; por lo tanto, la luz se polariza parcialmente. Como el máximum de brillo tiene efecto cuando el plano de incidencia sobre el analizador es perpendicular al plano de incidencia sobre el prisma, vése que en este caso el plano de polarizacion es perpendicular al de refraccion.

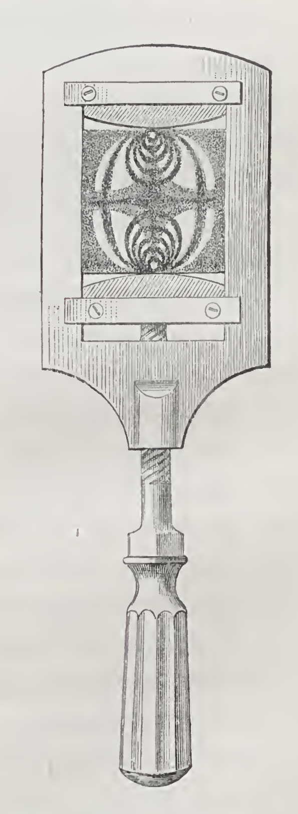


*Fig. 164.*—Colores de la luz en el cristal comprimido

Se obtiene un haz completamente polarizado por refraccion simple haciéndole atravesar sucesivamente muchas placas de vidrio paralelas

bajo un ángulo de 35° 25′ que, segun hemos visto, es el ángulo de polarizacion del vidrio. Estas láminas tenues, muy bruñidas, deben aplicarse unas contra otras, pero sin adherirlas completamente, de modo que quede interpuesta una tenue capa de aire entre dos láminas contiguas; el aparato así dispuesto se llama *pila de cristales*, y se le usa como polariscopio, poniéndole en el aparato de Biot en lugar del cristal I′.

No nos extenderemos más acerca de tan curiosa clase de fenómenos, cuya descripcion detallada nos llevaria demasiado léjos, y que para ser bien comprendidos exigirian desarrollos teóricos difíciles. Hemos querido tan sólo iniciar al lector en los hechos fundamentales, en aquellos cuyo descubrimiento ha sido el punto de partida de esta importante rama de la óptica moderna.

## III

### COLORES DE LA LUZ POLARIZADA

«Examinando, en un dia sereno, una lámina bastante tenue de mica con un prisma de espato de Islandia, ví que las dos imágenes que se proyectaban en la atmósfera no eran de los mismos colores; una era amarilla verdosa, la otra rojo-purpúrea, al paso que la parte en que las dos imágenes se confundian era del color que tiene la mica á la simple vista. Al propio tiempo reconocí que un leve cambio en la inclinacion de la lámina con relacion á los rayos que la atraviesan, hace variar el color de las dos imágenes, y que si, dejando subsistente esta inclinacion y el prisma en la misma posicion, se hace girar la lámina de mica en su propio plano, resultan cuatro posiciones en ángulo recto en que las dos imágenes prismáticas tienen el mismo brillo y son enteramente blancas. Dejando la lámina inmóvil y dando vuelta al prisma, vése tambien que cada imágen adquiere sucesivamente varios colores, pasando por el blanco á cada cuarto de revolucion. Por lo demás, para todas estas posiciones del prisma y de la lámina, cualquiera que fuese el color de uno de los haces, el segundo presentaba siempre la tinta complementaria, de suerte que en los puntos en que no estaban separadas ambas imágenes por la doble refraccion del cristal, la mezcla de estos dos colores formaba el blanco.»

En estos términos describe Arago, en una Memoria leida en la Academia de ciencias el 11 de agosto de 1811, el experimento que le sirvió de punto de partida para una serie de descubrimientos relativos á los fenómenos de coloracion de la luz polarizada. Reconoció inmediatamente que la luz trasmitida por la lámina de mica era luz polarizada por reflexion en las capas atmosféricas; estando el cielo nublado, cuando la luz que llega de las nubes tiene los caractéres de la natural, las dos imágenes vistas al través de la lámina de mica no presentan el menor indicio de coloracion. Así pues, para que ocurra el fenómeno se requiere que la luz que atraviesa la lámina cristalizada se haya polarizado de antemano. Arago puso fuera de duda esta condicion por medio de muchos experimentos en los cuales recibia en la lámina de mica rayos reflejados por un espejo de vidrio negro; notando entónces que los colores de las dos imágenes observadas con el espato de Islandia eran tanto más vivos cuanto más inmediato al ángulo de polarizacion del vidrio era el ángulo bajo el que se habia reflejado la luz.

Todas las sustancias birefringentes, talladas en láminas tenues paralelamente al eje, disfrutan igualmente de la propiedad de colorar la luz polarizada que las atraviesa; así es que se pueden emplear láminas de yeso (sulfato de cal), de cristal de roca y de espato de Islandia. Pero los espesores de estas láminas que dan los colores varían de una sustancia á otra; no obteniéndose imágenes coloreadas si este espesor no está comprendido entre ciertos límites. Por ejemplo, una lámina de sulfato de cal debe tener más de $0^{mm},425$ y ménos de $1^{mm},27$ de espesor; una de mica, ménos de $0^{mm},085$, y una de cristal de roca, ménos de $0^{mm},45$. Es difícil obtener colores con el espato de Islandia, porque el espesor de la lámina no debe exceder de la cuadragésima parte de un milímetro.

La inclinacion de la lámina con respecto á la direccion de los rayos polarizados influye en los colores, que varían rápidamente cuando dicha inclinacion cambia. Por último, para una misma inclinacion de la lámina é igual posicion del prisma, influye asimismo el espesor en la coloracion de las imágenes, y M. Biot, ha averiguado que las leyes de variacion de estos matices

son precisamente las mismas que Newton descubrió con respecto á los anillos de colores de las láminas tenues, obtenidos con la superposicion de dos lentes; siquiera los espesores de las láminas birefringentes, que corresponden á los colores de los varios órdenes de Newton, sean mucho más considerables que los de la capa de aire comprendida entre las lentes.

Hácese uso de esta propiedad del cambio de color de las imágenes segun el espesor para producir efectos variados y curiosos. Si, despues de pegar sobre vidrio una lámina de yeso, se practica en ésta una cavidad esférica de gran radio, y se la observa en el aparato de Biot de modo que la luz que llega al ojo despues de atravesar la lámina de yeso y el analizador se haya polarizado de antemano, se ve una serie de anillos coloreados concéntricos, como los que se notan alrededor del punto de contacto de dos lentes. Grabando en hueco sobre la lámina diferentes objetos como flores, insectos, mariposas, etc., se puede calcular las profundidades del grabado, en ciertos puntos, hasta reproducir los colores vivos y variados de los objetos naturales.

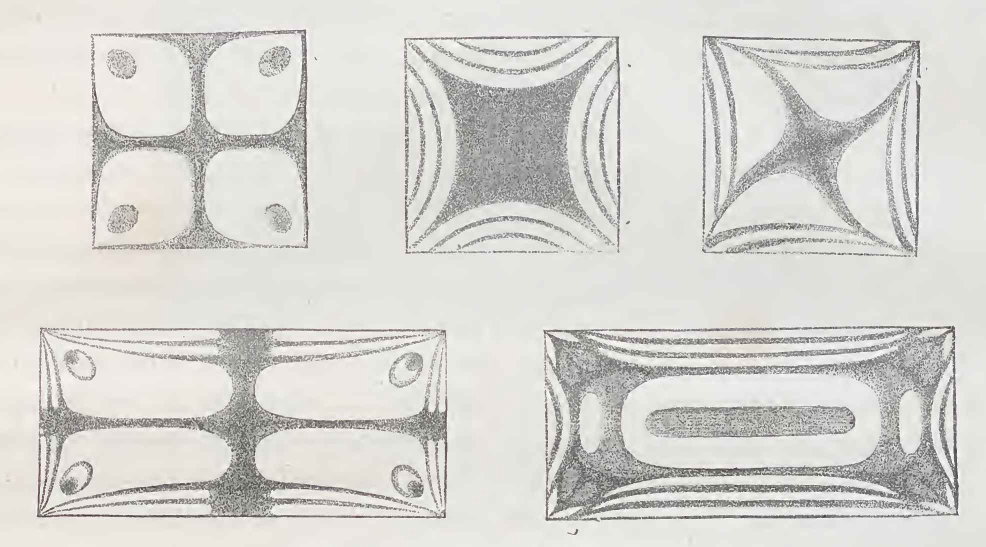


*Fig. 165.*—Colores de la luz polarizada en el cristal templado

«En otro tiempo se hacia más, decia recientemente M. Bertin en una interesante conferencia sobre la polarizacion; se aprovechaba esta circunstancia para tributar una especie de homenaje al autor de tan bonitos experimentos, y en medio de una corona de follaje aparecia el nombre de Arago con la fecha de su descubrimiento. Esto seria quizás una adulacion miéntras aquel grande hombre vivia, mas ahora que ya no existe, la supresion de este experimento en las cátedras de física es un acto de ingratitud: nos olvidamos de los difuntos por correr tras las mariposas.»

Es justo unir al nombre de Arago el de Brewster, que ha hecho á su vez y en la propia época, casi los mismos descubrimientos, especialmente el de los anillos de colores de uno y dos ejes.

Antes de entrar en algunos detalles sobre tan notables fenómenos, digamos que el vidrio, que en su estado ordinario no es apto para dar los colores observados en las láminas cristalizadas, adquiere esta propiedad por el temple, por la flexion y la compresion, y por la accion del calor. Las figuras 164 y 165 presentan algunas de las apariencias ofrecidas en tales circunstancias por placas de vidrio de cierto espesor y de forma rectangular ó cuadrada. Seebeck hizo en 1815 el descubrimiento de estos fenómenos, que son de la misma naturaleza que los acabados de describir. Hé aquí otro curioso experimento de Biot, referido por M. Daguin en su *Tratado de Física:* «Habiendo excitado este sabio vibraciones longitudinales en una tira de vidrio de 2 metros de longitud colocada entre el polariscopio y los polarizadores de su aparato, dispuesto para dar oscuridad, vió que á cada friccion brotaba una viva luz, cuyo brillo y color dependian del modo de frotar y del vigor del frotamiento.»

Los colores de la luz polarizada producidos por el paso de un haz de esta luz al través de una lámina tenue cristalizada dependen, segun

hemos visto, del espesor de la lámina, y varían cuando este espesor varía tambien. Pero cuando el espesor es el mismo la tinta es uniforme, porque todos los rayos que componen el haz son paralelos, y por lo tanto recorren el mismo espacio por el interior de la lámina.

Si en lugar de un haz, se recibe en la lámina polarizada un pincel cónico de luz, de modo que el eje del cono sea perpendicular á la superficie de aquella, claro está que los rayos recorrerán por el interior del cristal caminos tanto más largos cuanto más disten del eje, y ya no será uniforme la tinta que tome la lámina observada con un analizador. Entónces se ven sistema de anillos coloreados cuyas tintas y formas varían segun que el cristal sea de uno ó dos ejes óptiticos y segun la posicion del polariscopio con relacion al plano de polarizacion. Véase cómo se procede para que resulten tan agradables fenómenos.



*Fig. 166.*—Pinzas de turmalina

Cójese una pinza de turmalina, instrumento que consiste en dos anillos metálicos aplicados uno contra otro por un muelle en forma de pinzas y en cada uno de los cuales hay engastada una placa de turmalina; cada una de estas puede girar en su respectivo anillo de suerte que es fácil dar todas las posiciones angulares posibles á los ejes de los dos cristales birefringentes. Entre los dos anillos se interpone la lámina tenue cristalizada, de espato de Islandia por ejemplo, fija en el centro de un disco de corcho mantenido por la presion de los anillos entre las turmalinas. Basta mirar entónces la luz del cielo al través de las tres láminas para ver los anillos de colores. La placa de turmalina, vuelta hácia el cielo, polariza la luz difusa que, despues de atravesar esta primera placa converge hácia el ojo, pasando por la lámina de espato y la segunda turmalina.

Supongamos que se hayan colocado de antemano las dos turmalinas de manera que sus ejes sean perpendiculares; el plano primitivo de polarizacion será entónces paralelo á la seccion principal de la turmalina que sirve de polariscopio, y se verá una serie de anillos concéntricos irizados, atravesados por una cruz negra. Si en este momento se hace girar 90° el polariscopio, los ejes de las turmalinas serán paralelos, y la seccion principal de este formará un ángulo recto con el plano de polarizacion, siendo sustituida la cruz negra por otra blanca, y presentando los anillos irisados, á iguales distancias del centro, colores complementarios de los que presentaban en el primer experimento. En las posiciones intermedias de los ejes de las turmalinas se pasa gradualmente del primer aspecto al segundo.

Tales son los fenómenos que resultan cuando el observador se vale de la luz blanca. Si se valiera de luz homogénea, de la amarilla por ejemplo, obtendria anillos alternativamente brillantes y oscuros, atravesados por cruces análogas á las que hemos mencionado en los anteriores experimentos, siendo los brillantes de color amarillo. Si se emplearan los diferentes colores del espectro, los anillos de un mismo órden serian tanto mayores como más refrangibles dichos colores. Hé aquí por qué los anillos son irisados con la luz blanca, y por qué ocupa el morado, en este caso, el borde exterior del anillo en la primera posicion del polariscopio.

Brewster descubrió en 1813 los anillos coloreados producidos por la luz polarizada cuando atraviesa, convergiendo, láminas tenues de cristales birefringentes; los vió primeramente en el rubí, en la esmeralda, en el topacio, en el cristal y en el nitro, y más adelante los observó el doctor Wollaston en el espato de Islandia. Estudiando Brewster estos fenómenos en las diferentes sustancias cristalizadas, pudo distinguir los cristales birefringentes en dos clases, los de uno y los de dos ejes, y hé aquí cómo: miéntras que en el rubí, en la esmeralda y en el espato por ejemplo, no vió más que un simple sistema de anillos de colores, en el nitro y en el topacio, tallados en cierta direccion y observados con las pinzas de turmalina, etc., notó dos sistemas de anillos alternativamente oscuros y brillantes si la luz polarizada que los atraviesa es homogénea, é irisados si esta luz es blanca. Este fenómeno fué el que hizo descubrir á Brewster los cristales birefringentes de dos ejes.

Para observar los anillos á que aludimos, se talla una lámina de nitro perpendicularmente á

la línea media de los dos ejes y se la interpone entre los anillos de las pinzas de turmalina.

## IV

### DIRECCION TRASVERSAL DE LAS VIBRACIONES LUMINOSAS

No pasaremos adelante en la descripcion de los fenómenos que produce la luz polarizada, fenómenos de los más interesantes y cuya sola enumeracion exigiria muchas páginas. Confesamos que el objeto que nos hemos propuesto al abordar esta parte de óptica, consiste mucho más en excitar la curiosidad del lector y en inducirle á profundizar este estudio, que en darle una idea clara de las causas de estos fenómenos, es decir, mostrarle qué explicacion se les da en la teoría de las ondulaciones. Sin embargo, no podemos dispensarnos de resumir en breves frases los importantes progresos hechos por la teoría á impulso de los descubrimientos que tan rápidamente se han seguido desde principios del siglo actual.

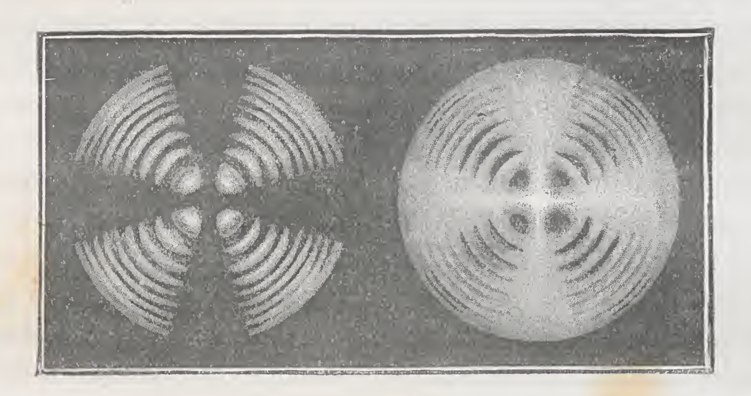


*Fig. 167.*—Anillos coloreados de espato

En uno de los anteriores capítulos hemos visto que los fenómenos luminosos dimanan del movimiento vibratorio del medio elástico llamado éter. Los fenómenos de interferencia, inexplicables en el sistema de la emision, tienen por el contrario, en la hipótesis de las ondulaciones una explicacion sencillísima y satisfactoria; pero no nos enseñan nada en lo que respecta al sentido en que se efectúan las vibraciones del éter. Podia suponerse con no menor verosimilitud que las oscilaciones de una molécula tienen efecto, ora en el sentido de la propagacion de la luz, ora en direccion paralela á la superficie de las ondas, ó perpendicular al rayo luminoso, ó ya en fin en una direccion cualquiera oblicua á este rayo.

Mas al adoptar la primera hipótesis, la que asimila, por decirlo así, las ondas luminosas á las sonoras, era imposible dar perfecta cuenta de la transformacion que sufre un rayo luminoso cuando atraviesa un medio birefringente, ó se refleja bajo cierto ángulo en la superficie de un cuerpo pulimentado. Si las vibraciones son longitudinales, ¿por qué ha de tener el rayo polarizado, propiedades particulares en ciertos planos? ¿Por qué pertenecerán exclusivamente estas propiedades á ciertos lados del rayo? Estas objeciones eran un grave ataque á la teoría de las ondulaciones, cuando se le ocurrió á Fresnel sustituir á la hipótesis de las vibraciones longitudinales la de las vibraciones trasversales perpendiculares á la direccion de la propagacion luminosa. En este caso, un rayo de *luz natural* es aquel en que se efectúan sucesivamente los movimientos vibratorios en todos sentidos en la superficie de la onda, debiendo por lo tanto ser sus propiedades las mismas en todos sus lados. Pero si este rayo llega á atravesar un polariscopio, al salir del medio birefringente, en lugar de efectuarse en todos sentidos las vibraciones de que se compone, serán paralelas, sin que por eso dejen de verificarse siempre en planos perpendiculares al rayo. El polarizador ha tamizado, por decirlo así, las vibraciones del rayo de luz natural, deteniendo ó destruyendo las unas para no dar paso sino á las que se hallan en el plano de la seccion principal. Expresándonos con más precision diremos que toda vibracion paralela á la seccion principal pasa sin alteracion al cristal; toda vibracion perpendicular queda destruida, y las oblicuas á las dos primeras se descomponen en

otras dos, una paralela á la seccion principal del polarizador y que pasa; otra perpendicular, que queda detenida. De aquí resultan las propiedades de la *luz polarizada*, que dejamos descritas.

Las consecuencias de la teoría de las ondas, modificada de este modo, son muy numerosas; hasta el presente, todas han sido comprobadas por la experiencia, ó si se quiere, los fenómenos descubiertos por la observacion se explican como los deducidos de la teoría, con un rigor que es la sancion más brillante de los principios que constituyen el sistema de las ondas.

Agreguemos ahora unas cuantas líneas acerca de las aplicaciones que se han hecho de la polarizacion de la luz al estudio de las ciencias físicas y naturales.

Arago se valió de la polarizacion por doble refraccion para construir un aparato fotométrico, basado en la intensidad relativa de las dos imágenes, intensidad cuya ley ha formulado Malus. El mismo sabio ha indicado un medio para distinguir en el mar los escollos ocultos bajo el agua y disimulados por el brillo de la luz reflejada en la superficie. Mirando con un prisma de Nicol, despues de colocar verticalmente la seccion principal, los rayos reflejados se disipan, y los refractados, únicos que llegan al ojo, revelan la presencia de las rocas sumergidas.

La polarizacion por reflexion permite tambien reconocer si la luz que procede de un cuerpo ha sido reflejada en su superficie. Así es como se ha comprobado la naturaleza de la luz de los astros, que, como la Luna y los planetas, se limitan sencillamente á enviarnos los rayos del Sol, y cómo se ha reconocido que la luz de los núcleos cometarios es en parte la misma del astro solar, puesto que varios observadores han visto indicios de polarizacion en un plano que pasaba por el Sol y por el núcleo.

La luz del arco-íris se polariza en un plano vertical al arco y que pasa por el ojo del observador; y en efecto, más adelante tendremos ocasion de ver que el arco está formado de luz reflejada por las gotitas esféricas de la lluvia. Arago se valió de la polarizacion por reflexion para averiguar la naturaleza de ciertas piedras preciosas, y habiendo hecho tallar una pequeña faceta en la superficie de una de ellas, determinó el ángulo de polarizacion y reconoció que era exactamente el del diamante. La polarizacion cromática es de gran auxilio para el estudio de los cristales, pues merced á ella se puede reconocer si cualquier cristal tiene uno ó dos ejes de simetría, la posicion de estos ejes en el cristal, etc.

Por último, el cuarzo y gran número de líquidos, como el agua azucarada, las soluciones de ácido tártrico, la albúmina, gozan de cierta propiedad que los físicos han caracterizado con el nombre de *poder rotatorio:* una placa de cuarzo, tallada perpendicularmente al eje, desvía cierto ángulo el plano de polarizacion de los rayos que la atraviesan, desviacion que es diferente para los rayos de los colores simples. Si la luz polarizada que ha atravesado el cuarzo es luz blanca, los colores que la componen se disiparán en proporciones diferentes, resultando cierta tinta procedente de la mezcla de los rayos que no se han disipado. Este es el fenómeno de la *polarizacion rotatoria*, descubierto por Arago en 1811 y cuyas leyes ha estudiado Biot experimentalmente.

Estas leyes han proporcionado á la industria un precioso método, la *sacarimetría*, mediante el cual se puede reconocer la cantidad de azúcar puro que contiene una disolucion azucarada.

Vése por esto que los fenómenos que al pronto parece que no han tener nada de interesante sino su teoría, pueden venir á parar en aplicaciones prácticas de gran importancia.

---

# CAPÍTULO XV

## COLORES DE LOS CUERPOS

### I

### COLORES DE LOS SÓLIDOS Y DE LOS LÍQUIDOS INCANDESCENTES

El análisis espectral de los focos luminosos nos ha hecho ver que en la composicion de la luz hay tantos colores ó matices de colores simples como radiaciones contienen dichos focos. Las ondas luminosas producen así en nuestra retina impresiones que pasan á nuestro cerebro produciendo en él la sensacion del color, del propio modo que las vibraciones sonoras, más ó ménos rápidas determinan en nosotros la sensacion de los sonidos sucesivos, graves con respecto á las ondas cuya propagacion es más lenta, agudos relativamente á las que se propagan con mayor rapidez. La serie de vibraciones luminosas perceptibles por nuestros ojos está comprendida entre el rojo más oscuro del espectro solar y el morado extremo; ántes ó despues de estos colores hay, segun hemos visto, vibraciones más lentas como tambien vibraciones más rápidas; pero ni las unas ni las otras causan en nosotros sensacion de color. Así tambien, no percibe nuestro oido las vibraciones capaces de engendrar el sonido tan luégo como su rapidez no llega á cierto límite ó traspasa otro límite superior. Pero las dos escalas limitadas de los sonidos y de los colores se parecen además, en que son continuas, pasándose de un extremo á otro por gradaciones insensibles.

Con todo, se ha hecho notar con razon una diferencia entre los sonidos y los colores, la cual consiste en lo siguiente: Nuestro oido distingue perfectamente cada una de las sensaciones que corresponden á sonidos simultáneos: el conjunto de estos, áun en el caso de que entre ellos existan las relaciones necesarias para que formen acordes armónicos, no produce una sola sensacion, y los oídos ménos ejercitados reconocen que hay, no un sonido único, sino simultaneidad de varios. En cambio, cuando la reunion de muchos colores ó sea de las radiaciones de varias longitudes de onda llega á herir á la vez nuestra retina, no producen en ella sino un solo color. Por ejemplo, el conjunto de todas las radiaciones que constituyen la luz solar, la union de todos los colores del espectro de matices infinitos, produce en nosotros la sensacion del color ó de la luz blanca, sin que nada nos haga sospechar que haya simultaneidad y multiplicidad de radiaciones.

Consideremos varios focos de luz, ya sean artificiales ó ya naturales, y comparemos la sensacion que en nosotros excitan en cuanto al color respecta con la que nos produce la luz blanca del sol, ó con los matices del espectro ó con sus asociaciones: esta comparacion nos inducirá á clasificar estos focos en varias categorías, en luces blancas y de colores, en luces compuestas y simples ú homogéneas. Por otra parte, el análisis espectral de dichos focos nos da á conocer la razon de su coloracion particular, fundada en el predominio de tales ó cuales radiaciones, de estas ó de las otras rayas brillantes en el espectro de su luz.

Ciertas luces tienen un parecido más ó ménos perfecto con la del sol, como por ejemplo la del magnesio, la del arco voltaico y la de los metales en fusion. Ya se comprenderá que al decir esto nos referimos á su parecido general y no á las particularidades que indica el análisis, como las rayas oscuras que surcan el espectro de la luz solar. Pues bien, el carcáter comun á todas las luces blancas es el de tener por orígen la reunion de ondas de todos los grados posibles de refrangibilidad entre los límites de las longitudes de onda que pertenecen á la parte luminosa del espectro; por lo ménos no presentan sino algunos espacios vacíos sumamente apiñados.

El color de un sólido incandescente depende de la temperatura, y así lo hemos comprobado



ya, al hablar de las tintas que toma el platino, desde el rojo oscuro que corresponde á una temperatura de 60°, hasta el blanco deslumbrador que representa la de 1500°. Pero lo que hay de particular en este aumento el número de radiaciones es que se verifica de un modo continuo, sin solucion de continuidad, y en una extension sucesiva de la menor á la mayor refrangibilidad. Por lo regular, no sucede lo mismo con la luz de los vapores ó de los gases incandescentes. Entremos en algunos detalles referentes á ellos.

## II

### COLORES DE LAS LLAMAS

Un pedazo de metal, de platino por ejemplo, calentado hasta tornarse luminoso, no emite al principio sino rayos muy poco refrangibles correspondientes á la parte roja del espectro, y por consiguiente á las vibraciones luminosas más lentas. Si se eleva la temperatura, agréganse poco á poco nuevas radiaciones, vibraciones, más rápidas á las primeras, se dilata el espectro de la luz emitida, y cuando llega á abarcar todas las radiaciones posibles entre los límites visibles del espectro solar, la luz es enteramente blanca; llegando entónces la incandescencia al punto que se llama *blanco deslumbrador*. Esto es lo que ocurre con todos los sólidos y líquidos cuya temperatura se eleva hasta la incandescencia, caracterizándose la luz de estos cuerpcs por la continuidad del espectro.

Pero no sucede lo propio con los gases incandescentes ó con las llamas luminosas; pues el espectro de su luz es discontinuo. Los metales que en estado sólido ó líquido emiten rayos de todas las longitudes de onda, al ser reducidos á vapor no dan ya sino espectros discontinuos, compuestos de mayor ó menor número de rayas brillantes correspondientes á determinadas regiones del espectro, cada una de las cuales tiene su color propio. Así pues, la llama no es ya blanca; tiene un color particular que resulta de la asociacion ó de la mezcla de las partes luminosas ó coloreadas del espectro. Este es un punto que el análisis espectral ha puesto en plena evidencia.

Así pues, la mayor parte de las llamas luminosas son de colores, y la experiencia demuestra que esta coloracion depende de las sustancias que se hallan en ella en suspension y que la alta temperatura volatiliza. Mucho ántes que el análisis hubiera dado la explicacion de estos efectos, se sabia dar á las llamas ciertos colores. En los fuegos artificiales se obtenian llamas encarnadas mezclando nitrato de estronciana con sustancias explosivas; el sulfuro de antimonio daba fuegos blancos y la limadura de zinc, azules: tales son los efectos luminosos conocidos entre el vulgo con el nombre de *luces de Bengala*.

La luz de las velas y de las bujías, la del gas del alumbrado y la de las lámparas de aceite no es blanca, sino más ó ménos mezclada de rayos rojos y sobre todo amarillos. Este último color procede de las partículas de sodio que casi siempre contienen, es el color característico de la llama sódica, estando el espectro del sodio reducido, como hemos visto, á las temperaturas ordinarias de incandescencia, á una raya brillante doble, situada en el amarillo. Se forma una lámpara sensiblemente *monocromática* mezclando con alcohol una disolucion acuosa de sal mamia (cloruro de sodio).

Introduciendo en la llama de un mechero de Bunsen ó de una simple lámpara de alcohol sales de diferentes especies, se obtienen colores variados. Hé aquí, segun Herschel, algunos resultados.

Las sales de sosa dan á la llama un color *amarillo* homogéneo; las de potasa le comunican un *morado claro;* las de cal, *rojo de ladrillo;* las de estronciana, *carmesí brillante;* las de litina, *rojo;* las de barita, *verde-manzana* bajo; las de cobre, *verde-azulado;* las de cobalto, *azul*, y por fin, los sulfatos de hierro, de antimonio y de arsénico dan una luz ostensiblemente *blanca*.

Es fácil comprender la coloracion variada de las llamas teniendo en cuenta las rayas brillantes de los espectros de los elementos que las constituyen. Hemos visto que el espectro del litio se compone de dos rayas, una roja y otra anaranjada; el del estroncio de muchas rayas rojas; dos de las cuales son anaranjadas y otra azul; que el del potasio da una raya roja y otra morada, y el del bario muchas verdes y amarillas. Otros espectros son más complicados, siendo la resultante de las diferentes rayas bri-

llantes que los forman la que determina la coloracion compuesta de la llama en que su vapor se torna incandescente; el hierro, que da radiaciones numerosísimas en toda la extension del espectro luminoso, produce una coloracion blanca, como si su radiacion fuese continua, por decirlo así.

III

COLORES DE LOS CUERPOS OPACOS.—TEORÍA DE NEWTON

Lo que llamamos *color natural* de un cuerpo es el color con que le vemos cuando le alumbra una luz blanca muy pura, como la de los rayos solares.



*Fig. 168.*—Agustin Fresnel

Si el cuerpo es apto para reflejar en proporcion igual todos los colores de la luz blanca, será blanco á su vez, y de una blancura tanto más brillante cuanto mayor sea dicha proporcion. Por el contrario, á medida que esta disminuye, decrece la intensidad del color blanco, el cual se vuelve poco á poco ceniciento, se oscurece, hasta que por último llega á ser negro cuando la absorcion de todos los rayos coloreados del espectro es todo lo completa posible. Por lo tanto, los cuerpos *negros* son los de tal composicion molecular que su superficie absorbe todos los rayos de la luz, al paso que los cuerpos *blancos* son los que los reflejan todos.

Si la superficie del cuerpo tiene la propiedad de absorber todos los rayos coloreados del espectro á excepcion de uno, el rojo verbigracia, el cuerpo nos parece rojo, porque no refleja en nuestro ojo más que los rayos encarnados del espectro. Si dicha superficie absorbe tan sólo una porcion más restringida de los rayos coloreados, el color del cuerpo será el que procede de la mezcla de los rayos no absorbidos, siendo esto lo que explica el número considerable de colores y matices de los cuerpos, colores y matices más variados que los que componen el espectro en sí. Por consiguiente, los cuerpos *coloreados* son aquellos que, reflejando ciertos rayos, absorben otros. Si esta explicacion es verdadera, se podrá comprobar prácticamente.

Al efecto, hagamos de modo que un cuerpo

blanco reciba solamente los rayos amarillos del espectro, lo cual es fácil colocando el cuerpo en la cámara oscura y no dando paso más que á los rayos amarillos del espectro obtenido por un prisma. Dicho cuerpo parecerá amarillo; pero si lo iluminaran solamente los rayos rojos, verdes ó azules, seria respectivamente de estos tres colores. Un cuerpo negro seguirá, por el contrario, siendo negro, cualquiera que sea el color que le ilumina. Por último, un cuerpo rojo parecerá de un rojo intenso si se le ilumina con la luz procedente de los rayos rojos del espectro, al paso que parecerá negro si se expone á los rayos de los otros colores.

La experiencia confirma todos estos resultados. Obsérvase, sin embargo, que los cuerpos coloreados adquieren la tinta de los rayos que los alumbran, áun cuando estos no sean del color de aquellos; pero dicha tinta es tanto más viva cuanta mayor analogía haya entre el color propio de los cuerpos y el de los rayos que á ellos llegan. Así, por ejemplo, «el bermellon alumbrado por el rojo parece mucho más encendido; en el anaranjado y amarillo, parece de estos colores, pero su brillo es menor. Los rayos verdes le comunican tambien su color, mas á causa de la gran aptitud del rojo á reflejar la luz verde, parece oscuro y empañado; lo es mucho más en el azul, y en el añil y el morado es casi enteramente negro. Por otra parte, un pedazo de papel azul oscuro ó azul Prusia adquiere extraordinario brillo cuando se le expone á los rayos de añil. En el verde se vuelve verde, pero con menor viveza; en el rojo, parece casi negro.» (Herschel.)

Es preciso, pues, comprender la teoría de Newton en el sentido de que las superficies de los cuerpos coloreados son por lo general aptas para reflejar los rayos de cierto color en cantidad mucho mayor que los de los otros rayos, siendo esto lo que les comunica su color predominante. Sin embargo, dichas superficies no absorben enteramente los otros rayos, y esto es lo que les impide ser completamente negros cuando se los ilumina con una luz cuyo color difiere del que les es propio.

La coloracion de los cuerpos opacos parece debida sobre todo á los rayos reflejados especularmente.

Y en efecto, los cuerpos de superficie pulimentada son, por decirlo así, incoloros, ó mejor dicho, no parecen coloreados sino de las tintas de los objetos cuyas imágenes reflejan. Esto, no obstante, por perfecta que sea la tersura de un espejo, altera los colores de las imágenes, que parecen amarillentas en los espejos de superficie plateada ó dorada y rojizos en los de superficie cobriza. A veces es difícil de comprobar por simple reflexion la tinta propia de un espejo; pero poniendo dos de estos iguales y paralelos á corta distancia, los rayos que llegan al ojo despues de muchas reflexiones tienen una colocacion marcada.

Rara vez son los colores de los cuerpos idénticos á los colores simples de que se compone el espectro solar; en su mayoría son compuestos, de lo cual es fácil cerciorarse sometiéndolos aisladamente al análisis del prisma. Este análisis da un espectro formado de varios colores simples, siendo su mezcla la que produce el color particular observado. Basta mirar un objeto de color, como una flor ó un pedazo de tela, al través de un prisma, para observar que los bordes de la imágen paralela á la arista son irisados.

Si en lugar de iluminar un cuerpo colorado con la luz blanca del Sol ó con alguno de los colores simples que forman esta luz, se le alumbra valiéndose de otros focos luminosos, como la luz de una lámpara ó ciertas llamas artificiales, su color se altera. Nadie ignora que el verde parece azul visto de noche á la luz de una lámpara ó de una bujía, lo cual consiste en que esta luz contiene ménos rayos amarillos que la del dia: pues bien, siendo el verde un color que se obtiene mezclando el amarillo con el azul, si el primero falta en parte ó en todo, el matiz que resulta tira más ó ménos á azul. Esta última observacion nos lleva á hablar de los colores que se obtienen mezclando colores simples. Pero ántes, terminemos lo que nos proponíamos decir acerca de la teoría de Newton sobre los colores de los cuerpos no luminosos por sí mismos.

Procurando Newton investigar más profundamente las causas del fenómeno, supone que la luz incidente se descompone en la superficie. Una parte de ella queda absorbida, extinguida en los cuerpos opacos, al paso que los trasparentes la trasmiten. Otra es reflejada por las

moléculas superficiales, á poca profundidad en los cuerpos opacos, y á varias profundidades en los trasparentes. Esto es lo que explica por qué el color de la luz trasmitida es por lo comun en los segundos diferente de la reflejada. Hemos visto, por ejemplo, que el oro reducido á hojas sumamente tenues, da paso á una luz azul-verdosa, y que su color reflejado es amarillo ó amarillo-rojizo. «Habiéndose sumergido Halley en el agua á muchas brazas de profundidad en una campana de buzo, vió que tomaba un color carmesí el dorso de su mano sobre el cual caian los rayos solares al pasar por una abertura cerrada con un cristal, miéntras que la palma, iluminada por la luz que reflejaban las partes profundas del agua, parecia verde; de lo cual dedujo Newton que el agua da paso á los rayos rojos y refleja los morados y los azules.» (Daguin.)

¿Qué modificacion sufre la luz reflejada difusamente? ¿Cómo obra la estructura de los cuerpos en los diferentes rayos de colores para despedir los unos y apagar los otros? Lo que produce el fenómeno de las varias coloraciones, ¿es la forma, la densidad, el poder refringente de las moléculas ó bien todos estos elementos reunidos? Preguntas sumamente delicadas son estas, á las cuales no se puede responder con exactitud en el estado actual de la ciencia.

## IV

### CLASIFICACION DE LOS COLORES

La luz blanca del Sol, descompuesta por el prisma produce una serie de colores que corresponden á varios grados de refrangibilidad. Estos colores son en número infinito, por decirlo así, puesto que se pasa de un extremo á otro del espectro por matices insensibles; pero es costumbre distinguir siete colores principales, cuyos nombres, tomados en su órden natural, son los siguientes:

*Morado, añil, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo.*

Fundándose algunos físicos en la posibilidad de reproducir algunos de ellos mezclando al efecto los otros, obteniendo, por ejemplo, el verde con la mezcla del amarillo y del azul, el morado con la del azul y del rojo, etc., han tratado de demostrar que el espectro sólo está formado de *tres* colores elementales ó primitivos. Segun Brewster, estos colores son el rojo, el amarillo y el azul; segun Young, el rojo, el verde y el morado. Las proporciones en que se mezclan estos colores en las distintas partes del espectro, explican la variedad de los matices que lo componen.

Hoy nadie acepta estas últimas teorías, por haberse demostrado que eran inexactos los experimentos en que las basaban sus autores. Así, pues, todos los colores del espectro son simples, pudiendo considerarse ilimitado su número áun cuando en la práctica se los reduzca á siete principales.

El *blanco* no es un color simple, al contrario, es el más complejo de todos los colores compuestos. El *negro* no es un color, sino la carencia completa de toda luz. Los colores compuestos, tal cual nos lo presentan los cuerpos, son mezclas, en distintas proporciones, de todos los colores elementales.

Un experimento muy sencillo demuestra que se requiere el concurso de todos los rayos del espectro para producir el blanco perfecto. Este experimento consiste en interceptar cualquier parte del espectro ántes de que se proyecte en la lente que sirve para la recomposicion de la luz. «Por ejemplo, cuando se intercepta el morado, el blanco adquiere un tono amarillo, si en seguida se suprime sucesivamente el azul y el verde, el amarillo se va poniendo más rojo y pasa por el anaranjado al rojo escarlata y al punzó. Si se empieza por suprimir el extremo rojo del espectro, se hará pasar el blanco al verde bajo, luégo al verde brillante, al azul, y por último, al morado, interceptando sucesivamente los rayos ménos refrangibles. Si la parte media del espectro es la interceptada, la concentracion del resto de los rayos producirá varias tintas purpúreas, carmesíes, etc., segun la parte que se haya suprimido. Interceptando ciertos rayos se puede obtener el color que se quiera, no habiendo matices en la naturaleza que no se puedan imitar así perfectamente, con un brillo y una riqueza á los que jamás pueden llegar los colores artificiales.» (J. Herschel, *Tratado de la luz.*)

El número de colores compuestos, resultantes de la mezcla de los colores simples ó de los diferentes rayos coloreados del espectro, au-

menta pues de un modo, por decirlo así, indefinido. En breve veremos que es posible aumentarlo más, ya añadiendo cierta cantidad de luz blanca, ó bien mezclando negro en variables proporciones.

Llámase *colores complementarios* á los que con su mezcla producen el blanco.

Hay un medio muy sencillo para determinar los grupos de colores que tienen esta propiedad: ó sea interceptando al salir de la lente una parte del haz convergente que iba á formarse en el foco de la luz blanca. Esta porcion, recibida por un segundo prisma, se desviará y dará un color que será á no dudarlo complementario del producido en el foco de la lente, puesto que ántes de su separacion formaban el blanco.

Recurriendo Helmholtz á un procedimiento distinto que consiste en recibir dos colores del espectro al través de las hendiduras de una pantalla concentrándolos por medio de una lente, ha reconocido que hay un número indefinido de grupos de dos colores á propósito para formar con su mezcla blanco perfecto. Hé aquí algunos de los resultados obtenidos por este físico:

| Colores complementarios | Intensidades de los dos colores | |
|---|---|---|
| Morado,—amarillo—verdoso. . | 5 | 10 |
| Añil—amarillo. . . . . . . | 3 | 4 |
| Azul—anaranjado. . . . . . | 1 | 1 |
| Azul—verdoso—rojo. . . . . | 0,44 | 0,44 |

Las cifras que hay á continuacion de los grupos representan las intensidades relativas de cada color; los de la segunda columna corresponden á una luz viva, y varían cuando la luz incidente varía á su vez de intensidad.

Helmholtz ha dado además á conocer un medio sumamente sencillo para estudiar el resultado de la mezcla de dos colores. Sobre una mesa negra se ponen dos discos coloreados, uno del primer color y otro del segundo: en seguida se coloca verticalmente; el otro se percibe al través del cristal trasparente, viéndose además otra vez al segundo por reflexion. Si entónces se le pone de modo que su imágen parezca superpuesta al disco al través de la luna, los dos colores resultarán naturalmente mezclados, y será fácil juzgar del matiz producido por su composicion. De esta suerte dos discos teñidos de amarillo cromo y de azul cobalto respectivamente, dan blanco puro, lo que prueba que estos colores son complementarios.

En resúmen, todo color simple ó compuesto tiene siempre su color complementario; más aún, tiene una infinidad de ellos, porque si al color complementario se añaden proporciones variables de luz blanca, el resultado no puede ser más que blanco. Pero no se debe aplicar esta regla sino á los colores francos, es decir, á los que no están alterados por alguna proporcion de negro, pues en este caso, en lugar de un blanco perfecto, resultará un ceniciento más ó ménos oscuro.

Por último, la mezcla de los colores complementarios no produce blanco sino cuando dicha mezcla no es material; si se hace uso de colores materiales diluidos de cualquier modo, ó áun en estado pulverulento, la mezcla no dará más que un gris más ó ménos oscuro.

Si los colores, así simples como compuestos, son en número indefinido, si la mezcla en diversas proporciones de blanco ó negro multiplica todavía su número, es tambien positivo que la vista no puede apreciar distintamente más que una corta cantidad de ellos. Con todo, si fuese posible reunir en una misma escala todos los matices de colores que nos presenta la naturaleza y que nos es dado distinguir unos de otros nos causaria asombro su riqueza y magnificencia; las hojas y las flores en las plantas, las pieles de los animales, los brillantes colores de que están teñidas las plumas de las aves, las alas de las mariposas y de otros insectos, los matices de varios minerales, las conchas, etc., proporcionarian los elementos de la innumerable serie de colores naturales, y permitirian pasar de un matiz á otro por grados insensibles, con lo cual se tendria una clasificacion de los colores sacada de los objetos naturales.

Los colores empleados en las artes son probablemente más limitados; sin embargo, es fácil formarse una idea de su número recordando que los romanos aplicaban, segun se dice á sus mosaicos más de 30,000 tintas. Pero precisamente por ser muy considerable este número, se ha sentido la necesidad de hacer una clasificacion razonada de los colores y de sus matices que permita definirlos, refiriendo cualquiera de ellos á un tipo fijo determinado de una vez para siempre. Nadie ignora que, en la industria y

en las artes, la nomenclatura de los colores es muy arbitraria, ó por lo ménos que varía de un arte ó una industria á otra: los nombres, tomados de objetos naturales, minerales, flores, frutos ó animales, no tienen conexion alguna de gradacion. Para obviar los inconvenientes que de semejante confusion resultan, ha propuesto M. Chevreul una clasificacion de colores y matices cuya base y principios vamos á indicar.

Segun Chevreul, ninguna materia coloreada por alguno de los colores del espectro puede ser modificada sino de cuatro modos diferentes:

1.° Por el *blanco*, que aclarándola, atenúa su intensidad;



*Fig. 169.*—M. Chevreul

2.° Por el *negro*, que oscureciéndola, disminuye su intensidad específica;

3.° Por *cierto color*, que cambia su propiedad específica sin empañarla;

4.° Por *cierto color*, que cambia su propiedad específica empañándola, de suerte que si el efecto llega á su máximun, resulta negro, ó gris normal representado por negro mezclado con blanco en cierta proporcion.

Para expresar todas estas modificaciones, M. Chevreul emplea las expresiones siguientes que, una vez definidas, no pueden prestarse á ningun equívoco:

Llama «*tonos* de un color á los diferentes grados de intensidad de que este color es susceptible, segun que la materia que la presente sea dura ó esté simplemente mezclada con blanco ó negro; *gama*, al conjunto de tonos del mismo color; *matices* de un color, á las modificaciones que éste experimenta al agregarle otro color que lo cambia sin empañarlo; en fin, *gama rebajada*, á la gama cuyos tonos claros ú oscuros están empañados por el negro.»

Véase ahora cómo ha procedido para formar una escala, suficientemente extensa, de los colores principales, de sus tonos y de sus matices.

Despues de dividir un círculo en 72 sectores iguales, colocó á distancia igual tres muestras de lana teñida, la una de rojo, la otra de amarillo y la tercera de azul, tan puras como le fué posible y de la misma intensidad. Luégo, entre estos tres sectores y á igual distancia de cada uno de ellos, puso una muestra anaranjada entre la roja y la amarilla, una verde entre esta última

y la azul, y una morada entre la azul y la roja. Intercalando sucesivamente y del propio modo colores de matices intermedios obtuvo por fin lo que llama círculo cromático de los colores francos, reproduciendo hasta cierto punto el espectro de la luz solar.

Reunidos ya estos 72 matices, valióse de cada uno de ellos para componer una gama completa formada por la agregacion de cantidades crecientes de blanco y negro, hasta tener diez tonos rebajados y otros diez del mismo color aclarados hasta el blanco. Cada gama comprende así, desde el blanco puro hasta el negro puro, que son sus extremos, 20 tonos diferentes, el décimo de los cuales á partir del blanco es el color franco.

De esta primera combinacion resultan ya 1,440 tonos distintos, deducidos todos ellos del círculo cromático de los colores francos; pero, rebajando sucesivamente los 72 tonos de este círculo con la agregacion de 1, 2, 3, etc., décimos de negro, se forman nueve círculos de colores rebajados, y como cada uno de los 72 tonos que comprenden es á su vez tipo de una gama de 20 tonos nuevos que van del blanco al negro, resulta para la serie total una escala de 14,400 tonos, á los cuales hay que añadir los 20 del gris normal, lo cual da, en definitiva, 14,420 tonos diferentes.

Es indudable que tan extensa escala debe bastar para la mayor parte de las aplicaciones científicas é industriales, y que las más de las veces, excederá á las necesidades de los artistas. Por desgracia, es sumamente difícil la reproduccion material rigurosamente exacta de todos estos colores, no siéndolo ménos el conservar los tipos una vez obtenidos. Seria preciso reproducir la construccion cromática de M. Chevreul en colores inalterables, por ejemplo, en cuadros esmaltados sobre porcelana; las investigaciones científicas no estarán ménos interesadas que las artes en poser tipos fijos, á los cuales podrian referirse los colores naturales, con tanta frecuencia alterados por el tiempo, mediante una numeracion de órden, siendo por lo tanto de fácil reproduccion.

## V

### COLORES DE LOS CUERPOS TRASPARENTES.—DICROISMO

Los cuerpos ó medios dotados en el más alto grado de trasparencia, como el aire, el agua y el cristal, no poseen esta propiedad en absoluto, pues absorben una parte más ó ménos considerable de la luz que los atraviesa, como fácilmente se demuestra aumentando su espesor. Cuando la luz que penetra en un medio trasparente es la luz blanca, y despues de su paso continúa lo mismo, dícese que el medio es incoloro; fenómeno que se explica de un modo muy sencillo, ya admitiendo que no habia absorcion de ninguno de los rayos coloreados que componen la luz blanca, ó bien, si ha tenido efecto esta absorcion, que ha sido la misma para todos los rayos. El aire, algunos gases simples ó compuestos y el agua son medios trasparentes incoloros; sucediendo lo propio, áun cuando en espesores mucho menores, con el agua, el vidrio y ciertos cristales. En realidad, esta propiedad no es más absoluta que la trasparencia: la luz trasmitida por capas de aire suficientemente espesas está matizada de diferentes colores que varían del azul más ó ménos intenso al azul verdoso, al amarillo y al rojo. Estas últimas tintas son propias de las capas más bajas de la atmósfera vistas un poco ántes ó despues de la puesta del sol. El agua adquiere tambien una tinta que depende de su pureza y de su profundidad en los rios, en los lagos y en la mar. Por último, todos sabemos que el vidrio, que parece absolutamente incoloro cuando tiene muy poco espesor, se tiñe de matices que dependen de su composicion cuando se trasmite la luz blanca al través de placas más gruesas. Obsérvase tambien y de un modo más marcado esta coloracion de los medios trasparentes en los cuerpos ó medios que son simplemente diáfanos.

Así como se explican los colores de los cuerpos opacos por la absorcion desigual de los rayos difusos de refrangibilidades distintas, así tambien se explica la coloracion de los cuerpos trasparentes por la absorcion desigual de los rayos trasmitidos. En el primer caso, la luz que hace visibles los cuerpos y que suponemos blanca se descompone por reflexion difusa; en el segundo, se descompone por trasmision. Al expresarnos así, no hacemos más que consignar un hecho, una propiedad evidente de los cuerpos, sin prejuzgar nada acerca de la naturaleza íntima del fenómeno; la verdadera causa de esta descomposicion que depende sin duda de

la ordenacion molecular, de la composicion física y química de los cuerpos, es todavía desconocida, ó por lo ménos sólo ha dado lugar á hipotésis que tienen divididos á los físicos.

Las placas de vidrio de color puestas sobre un fondo negro son casi invisibles; lo propio sucede con los líquidos trasparentes coloreados contenidos en vasijas de paredes oscuras ó ennegrecidas; por consiguiente es la luz trasmitida, y no la reflejada, la que nos hace ver estos cuerpos. Así por ejemplo, un vidrio rojo es el que, dando paso á los rayos rojos, absorbe ó extingue los demás rayos del espectro de la luz blanca, ó que, por lo ménos absorbe estos rayos en mucha mayor proporcion que los rojos. Los vidrios, los líquidos amarillos, verdes, azules y morados son los que no dejan pasar sino los rayos de los mismos colores absorbiendo los demás, ya en su totalidad, lo que rara vez sucede, ó ya en bastante proporcion para que los rayos que pasan compongan la tinta indicada por estos colores. La reflexion especular, en sus superficies lisas, de un objeto blanco da una imágen blanca, mientras que el objeto visto por trasmision se colora de la misma tinta que el medio.

Un experimento, muy sencillo, descrito ya en el capítulo en que hemos tratado de la absorcion de la luz, demuestra la desigual absorcion de los rayos de varias refrangibilidades por un mismo medio coloreado. Si se interpone una lámina de vidrio encarnado en el paso de un haz de luz solar, ántes ó despues de su descomposicion por el prisma, el espectro obtenido sólo contiene ya la parte ménos refrangible y se reduce al rojo si la tinta del vidrio de color es bien homogénea. Con un vidrio de azul cobalto de cierto espesor, el espectro se reduce al morado, y en el otro extremo, á una delgada banda roja, y si dicho vidrio está tallado en forma de prisma ó de bisel agudo, y se examina el espectro solar interponiendo partes cada vez más gruesas del vidrio azul entre el espectro y el ojo, se verá que la absorcion de los rayos intermedios entre el morado y el rojo extremo va creciendo con dicho espesor. A partir de un milímetro, la parte central del rojo es la que se extingue primero, y conforme crece el grueso ó espesor del vidrio desaparecen sucesivamente el rojo anaranjado, el amarillo, el verde y por fin el azul.

El bisel de vidrio azul cobalto, unido á un prisma de vidrio blanco que forma con él una lámina de caras paralelas, parece en efecto azul oscureciéndose más y más, desde su parte más tenue hasta cierto espesor, pasado el cual, como predomina el rojo, el vidrio parece de este color, cambiando así de matiz, al propio tiempo que varía la proporcion de los rayos absorbidos. Esta tinta roja procede indudablemente de los rayos rojos extremos, más vivos que los morados.

Ya hemos tenido ocasion de mencionar este singular fenómeno de cambio de color que los físicos llaman *dicroismo*, ó más generalmente *policroismo* porque variando los espesores de ciertas sustancias trasparentes, se obtienen tintas ó colores múltiples. Las más de las veces, el matiz del color es el único que cambia por efecto del espesor, y por esto los vidrios rojos se vuelven más oscuros y su color es más puro. Los verdes y las soluciones de sales de cobre ó nickel, que absorben principalmente los rayos de los colores extremos, rojo y morado, tienen una tinta verde tanto más marcada cuanto mayor es su espesor. El percloruro de hierro, el cloruro de oro, el infuso de azafran y el vino de Oporto que absorben los rayos más refrangibles y casi dan paso del mismo modo á los rayos rojos y á los amarillos, parecen de este último color si tienen poco espesor, pero se oscurecen si este aumenta hasta que por fin llegan al rojo. Hay varias sustancias dicróicas, entre ellas las soluciones de cloruro de cromo, de manganato de potasa, y el agua celeste ó solucion saturada de sulfato de cobre en el carbonato de amoniaco. Las primeras parecen verdes y luégo rojas: la última parece azul cuando está en láminas tenues, y morada cuando el espesor llega á diez ó doce centímetros.

Dos líquidos, el uno rojo y el otro verde ó azul, forman mezclados un medio dicróico, con tal que su mezcla no dé lugar á una combinacion química.

Segun acabamos de ver, un vidrio azul cobalto parece rojo cuando su espesor es tal que absorbe todos los rayos amarillos, verdes y azules de la parte media del espectro. Por el contrario, una lámina tenue de sulfato de cobre, absorbe los rayos extremos, morados y rojos. ¿Qué sucederá, pues, sobreponiendo dos lámi-

nas de estas sustancias? Que quedarán absorbidos los rayos de todos los colores del espectro: y en efecto el conjunto de las dos láminas forma un medio opaco.

Brewster ha reconocido que el calor modifica las propiedades absorbentes de un medio coloreado: tan pronto las disminuye como las aumenta. Remitimos sobre esto al lector á lo que hemos consignado en la página 152 acerca de los experimentos del físico inglés.

Todos los hechos que acabamos de describir se refieren á los medios coloreados trasparentes. Los simplemente diáfanos ó traslúcidos presentan fenómenos análogos, sólo que son visibles á la vez por trasmision y por reflexion, de suerte que su color es visible áun cuando se los coloque delante de un fondo negro. Un líquido perfectamente límpido, como el bicronato de potasa, pierde su trasparencia y se vuelve diáfano si se le echa un poco de sulfato de barita; pero sigue conservando su tinta amarilla, que áun en este caso se ve lo mismo por trasmision que por reflexion.

Sin duda deben de ser diminutas partículas en suspension en el agua las que dan á este líquido varias tintas azules, amarillas ó rojizas, segun la naturaleza de las partículas. Pero no hay que confundir esta causa de coloracion ni con la tinta propia del agua ni con la que adquiere al trasmitir por reflexion el color del fondo en que descansa.

Hay cuerpos gaseosos de coloracion particular, por ejemplo, el vapor de iodo, cuya magnífica tinta morada ha dado su nombre al metaloide; el ácido nítrico desprende vapores blancos al aire libre, y el hiponítrico densos vapores rojizos. Citemos, finalmente, el cloro, cuyo nombre proviene del matiz amarillo-verdoso de este gas.

El aire, que, como nadie ignora, es una mezcla de dos gases, oxígeno y nitrógeno y que además contiene cierta proporcion de gas ácido carbónico y tambien vapor de agua, posee el color azul de todos conocido y que se modifica, se oscurece ó aclara segun las circunstancias atmosféricas. ¿Dicho color es propio de la mezcla gaseosa misma, que absorbe los vapores azules de la luz blanca del Sol trasmitiendo únicamente los rojos, de modo que el color azul se ve por reflexion, ya en las móleculas del mismo aire ó bien en las del vapor de agua en suspension? Cuestion es esta que áun no se ha podido resolver, ó por lo ménos cuyas varias soluciones tienen muy divididos á los físicos. Entremos en algunos detalles acerca de este punto.

## VI

### COLOR AZUL DE LA ATMÓSFERA

Leonardo de Vinci creia, como Gœthe algun tiempo despues, que el color azul de un cielo despejado tenia por causa el paso de la luz blanca al través de la atmósfera que contiene partículas tenuísimamente divididas. Newton atribuia dicho color azul á haber en la atmósfera esferillas de agua huecas y diminutas en las cuales son perceptibles los colores como en la pompa de jabon; añadiendo que cuando el espesor de las paredes de estas esferillas aumentaba, el color pasaba del azul al amarillo al anaranjado y al rojo, pudiéndose por lo tanto explicar, en virtud de las continuas reflexiones las diferentes tintas desde el azul celeste hasta el encendido color de las puestas de Sol. Basándose Clasius en esta teoría, ha calculado las intensidades relativas de la luz directa del Sol y de la luz difusa del cielo con respecto á las varias alturas del Sol.

«Algunos físicos, dice M. Roscoe, han asegurado que el aire mismo es azul, al paso que otros pretenden que si el aire adquiere un tono azulado por la influencia de la luz *reflejada*, debe parecer rojo por la luz *trasmitida*.

»Otros, para esquivar la dificultad de explicar la gran variedad de tintas que se ven en los ocasos del Sol, pretenden que estas tintas son una ilusion óptica ó que reconocen por causa la presencia de nubes que reciben y reflejan el color.

»Muchos físicos han sugerido la idea de que, estando la atmósfera llena de pequeñas partículas de materias sólidas flotantes, obra como un medio opalescente y no trasmite más que luz roja; pero á Brucke somos deudores de una exposicion completa y un exámen profundo de esta teoría. Forbes explica el fenómeno de muy distinto modo; pues, observando que en ciertas circunstancias el vapor acuoso, ó mejor dicho, el agua en partículas muy divididas, puede ab-

sorber los rayos azules, y que el sol parece rojo cuando se le ve al través de alguna porcion de un chorro de vapor, atribuye la tinta roja que se extiende por el cielo en el momento de la puesta del Sol á la sola presencia del agua en dicho estado particular de division.»

Despues de hacer estas breves consideraciones históricas sobre el asunto, el sabio inglés de quien hablamos describe las observaciones y experimentos en que se basa su propia opinion. En su concepto, la atmósfera ejerce una absorcion de especial naturaleza en los rayos de



*Fig. 170.*—Sir John Herschel

gran refrangibilidad; es decir, en los rayos del espectro que tienen gran actividad química; y habiéndole demostrado un crecidísimo número de observaciones que la luz difusa del cielo posee una actividad química mucho mayor en proporcion que la luz directa del Sol, ha llegado á considerar que esta absorcion, á la cual da el nombre de *opalescencia*, reconoce por causa una multitud de partículas finamente divididas que reflejan los rayos azules y sólo trasmiten los rojos. ¿Y qué son estas partículas? Los espórulos que causan la fermentacion y la putrefaccion, las moléculas minerales, como el sodio cuya presencia casi constante en el aire, nos la revela el análisis espectral, quizá tambien el polvillo molecular extra-terrestre que en sentir de ciertos físicos atraviesa en todo tiempo nuestra atmósfera, y por último las sutiles partículas acuosas de que esta está llena.

Roscoe compara la opalescencia de la atmósfera á la de los líquidos que contienen cierta cantidad de materia tenuemente dividida, por ejemplo al agua ligeramente azufrada, ó á la del vidrio en cuya masa hay diseminadas partículas de fosfato de calcio ó de trióxido de arsénico. «Si se hace pasar, dice, la luz blanca de una lámpara eléctrica por un tubo de tres piés de largo, cerrado en sus extremos con placas de vidrio y lleno de un líquido apénas opalescente, todos los rayos azules, verdes y

amarillos quedan interceptados, y el rayo que sale es rojo oscuro. Esto viene á ser una puesta de sol artificial. El azufre finamente dividido refleja la luz azul y trasmite la roja. Si el azufre opalescente disminuye en un tercio la luz visible, intercepta enteramente los rayos químicos. El vidrio opal parece blanco ó blanco-azulado por la luz reflejada y rojo por la trasmitida.

«Finalmente, la tinta puede variar del rojo oscuro al amarillo y hasta al azul, segun el grueso de las partículas reflectoras, y así se explican los variados matices de los crepúsculos y de las auroras.»

Otro físico inglés, Tyndall, ha hecho deducciones muy parecidas á las de Roscoe; pero ha procurado profundizar más aún la naturaleza íntima del fenómeno. No podemos mencionar aquí todos sus experimentos, á pesar de lo cual creemos oportuno reproducir algunos párrafos del sabio físico en los que interpreta ingeniosamente la causa del color azul del cielo:

«En realidad, sea cualquiera el agente que nos envia la luz del cielo, ejerce una accion dicróica. La luz reflejada es azul; la trasmitida, anaranjada ó roja; por consiguiente, hay aquí una marcada diferencia entre la sustancia del cielo y la de una nube ordinaria, la cual no ejerce ninguna accion dicróica de este género. Reuniendo las fuerzas de la imaginacion y de la razon, podemos penetrar este misterio del modo siguiente. En la nube no influye la magnitud de las ondulaciones del éter, pero las refleja todas igualmente; no las escoge, lo cual puede proceder de que sus partículas son tan grandes con relacion á las ondas del éter, que las refleja todas indistintamente. Supongamos que las partículas reflectoras, en lugar de ser muy grandes, sean muy pequeñas con relacion á las ondas. En este caso, no detienen y despiden en gran parte la onda entera, sino que tan sólo rompen y reflejan una pequeña porcion de ella, sobre la cual pasa la gran masa de la onda sin sufrir reflexion alguna. Lancemos, pues, con el pensamiento á nuestra atmósfera un puñado de esas pequeñas porciones extrañas, y recomendemos á nuestra imaginacion que observe su accion en las ondas solares. Las ondas de toda magnitud chocan con dichas porciones, y á cada choque se ve una parte de la onda herida desprenderse por reflexion.»

Tyndall compara entónces las ondas rojas con las olas del Océano y las azules con las simples arrugas del agua, y demuestra que las partículas de la atmósfera deben reflejar en mayor proporcion las ondas más pequeñas, de suerte que el azul será el color dominante de la luz reflejada.

«Ocupémonos ahora, continúa, de la luz que pasa entre las partículas sin dispersarse. ¿Qué es de ella en definitiva? A consecuencia de sus choques sucesivos con las partículas, la luz blanca va perdiendo más y más la proporcion de azul que debe contener. Fácil es prever lo que de esto resulta. La luz trasmitida á cortas distancias debe parecer amarilla, mas á medida que el Sol desciende hácia el horizonte, aumenta el espesor de la atmósfera atravesada y con él el número de partículas que dispersan la luz, las cuales la hacen perder sucesivamente el morado, el añil, el azul, y hasta alteran las proporciones del verde. La la luz trasmitida en tales circunstancias debe pasar del amarillo al anaranjado, y luégo al rojo. Esto precisamente es lo que nos presenta la naturaleza, y al paso que la luz reflejada nos ofrece á medio dia el azul oscuro del cielo de los Alpes, la trasmitida nos ofrece al ocaso el rojo encendido de las nieves de los Alpes. Es indudable que estos fenómenos ocurren como si nuestra atmósfera fuese un medio ligeramente perturbado por partículas extrañas de suma tenuidad, que se mantuvieran mecánicamente en suspension en ella.»

Debemos hacer asimismo mencion de los experimentos de M. A. Dupasquier, que ya en 1845 se ocupaba de la influencia de las partículas finamente divididas en la coloracion azul de los medios en que se hallan en suspension. La plata, el azogue, el bismuto, el arsénico, el antimonio en polvo y varios compuestos metálicos en suspension en un líquido, le han presentado en diferentes grados una tinta azulada; y á causa de esto indica si seria posible explicar de la misma manera «ciertas coloraciones azules que se notan en la naturaleza, por ejemplo, la de los glaciares, que tal vez dimanara de su estado de granulacion, y la de los lagos, que podria depender de ciertas partículas heterogéneas sutilísimas, mantenidas en suspension en una masa de agua de gran espesor.»

Estas cuestiones han sido estudiadas y resueltas despues, especialmente por Tyndall, en el sentido que ha treinta y cinco años indicaba Dupasquier.

La iluminacion de los medios trasparentes ha sido objeto de nuevos é interesantes estudios por parte de M. Lallemand; mas aparte de que estos no están aún terminados, su reseña nos obligaria á entrar en consideraciones más elevadas de lo que permite esta simple descripcion de los fenómenos de la luz y de los colores.

## VII

### INFLUENCIA DE LAS LUCES ARTIFICIALES EN LOS COLORES DE LOS CUERPOS

Nadie ignora que los colores no son á la luz del dia los mismos que de noche á la luz de las lámparas de aceite, de las bujías ó del gas. Como se ha convenido en llamar á los diurnos *colores naturales*, resulta que todas las luces que no sean la solar, y en especial las luces artificiales, alteran más ó ménos los colores. Una tela que parece azul de dia parece verde de noche y viceversa. Este efecto no deja de tener su importancia para los tocados de las damas, para los adornos y tapices de los salones y para las decoraciones teatrales. Aquí sólo nos toca hablar de él desde el punto de vista de la causa de dichas alteraciones, que el análisis prismático de las llamas basta para hacer comprender. Tomaremos algunos detalles y datos curiosos de un trabajo hecho acerca de este asunto por el químico francés Nickles.

Este sabio reconoció que el percloruro de manganeso combinado con el éter forma una sustancia que en plena luz del dia es de un hermoso verde, y á la del gas parece negra.

Un pigmento de un bonito color carmesí, sacado del ligustro, colora de azul ciertas soluciones salinas. Tal es por lo ménos el color que resulta de dia. Iluminadas por el gas estas soluciones azuladas adquieren diversas tintas: roja, si la solucion contiene carbonato de cal ó cloruro de zinc; verde si es nitrato de cal ó cloruro de calcio; azul, si bicarbonato de potasa.

Pues bien, estos cambios de color no ocurren si en vez de alumbrar con gas dichas soluciones, se hace uso de la luz de magnesio. Lo propio acontece con la combinacion etérea del percloruro de manganeso, la cual es verde á la luz del magnesio y á la del dia. La luz eléctrica tampoco hace perder á los cuerpos los colores con que se los ve á la luz solar.

¿De qué dimana esta diferencia entre la luz del magnesio ó del arco voltaico y la producida por el gas de carbon de piedra, por el aceite de las lámparas ó por la estearina de las bujías? Del sodio que estas últimas luces contienen siempre en corta aunque suficiente cantidad para comunicar á las llamas el matiz amarillento que proviene de la raya del espectro sódico. Los experimentos hechos no dejan la menor duda acerca de esto: y sabemos, en efecto, que todos los colores del espectro, excepto el amarillo, se extinguen á la luz monocromática del sodio, sirviendo esta circunstancia de explicacion á los efectos que Nickles describe. Habiendo alumbrado con luz sódica papeles coloreados, unos de verde (manganato de barita), otros de color de naranja (bi-ioduro de mercurio), y otros de amarillo cromo, todos ellos colores magníficos á la luz del dia, y ménos vivos ya á la del gas, vió que el verde se volvia negro, miéntras que el amarillo y el anaranjado parecian blancos. Varios cristales verdes de acetato de cobre, rojos de nitro-prusiato de sosa, de ioduro de antimonio y de arsénico, parecen negros á la luz amarilla del sodio, que altera tambien el color verde de las hojas, y apénas cambia de tono los azules, excepto el de ligustro. El cloruro de cobalto cristalizado, que á la temperatura ordinaria es de color de rosa, adquiere una magnífica tinta azul cuando se le calienta en una redoma. La llama del sodio no altera este color, á pesar de ser tan desfavorable como acabamos de ver á la mayor parte de los demás.

La luz de la lámpara sódica comunica un color cadavérico, de un verde lívido, á las manos y al rostro de las personas á quienes alumbra, y cuyos labios parecen amoratados. «Estas tintas, dice Nickles, provienen indudablemente del azul, único que ha podido resistir los efectos de extincion causados por la llama de sosa. Por lo demás, todo el que haya visto flamear un ponche ó un pudding conoce este color, porque en ellos figura en primer término el alcohol salado. Afortunadamente, este efecto desaparece con la causa que lo produce, y por fortuna tambien las llamas del alumbrado público no están

saturadas de sodio, de lo contrario estaríamos expuestos de noche á verlo todo azul. Pero aunque no estén saturadas de sodio, son lo suficientemente amarillas para formar verde con ciertos azules, y hé aquí sin duda por qué ciertas telas azules parecen verdes de noche, y tambien por qué en una habitacion muy alumbrada puede suceder que se distinga con dificultad un traje verde de otro azul, pues el verde puede resultar un poco más oscuro, miéntras que el azul formará verde con la luz amarilla del alumbrado.

Estos experimentos no carecen de interés por lo que respecta á las artes. Como la llama sódica tiene la propiedad de abolir los colores, por decirlo así, un cuadro iluminado por ella aparece como un dibujo cuyos contornos subsisten gracias á las medias tintas. Es poco más ó ménos el efecto que produce la fotografía. Pero creemos que no siendo la absorcion, en el primer caso, proporcionalmente igual para todos los colores, debe resultar una alteracion de los valores relativos de los tonos, como sucede tambien en las mejores fotografías.

# CAPITULO XVI

## FOTOMETRIA

### I

#### PRINCIPIOS DE FOTOMETRÍA

Todos sabemos por observarlo diariamente, que la potencia lumínica de una luz varía con la distancia á que se encuentra del foco el objeto iluminado. Cuando leemos de noche á la luz de una lámpara ó de una bujía, podemos notar tambien que, sin alterar la distancia á que de ésta nos hallamos, podemos obtener grados variables de claridad, inclinando de cierto modo las páginas del libro; y finalmentè, si en lugar de una bujía ponemos muchas á la misma distancia, ó si en vez de una lamparilla pequeña nos servimos de otra mayor cuya mezcla produzca una llama más ancha, no resultará ménos evidente que la claridad aumenta en cierta proporcion.

Por otra parte, la potencia lumínica varía, en igualdad de circunstancias, con la naturaleza de los focos luminosos. La llama de una luz de gas nos parece mucho más deslumbradora que la de un quinqué; la luz de la Luna es muchísimo ménos intensa que la del Sol, áun cuando los discos de los dos astros tengan poco más ó ménos la misma magnitud aparente.

Así, pues, cuando se quiere apreciar la intensidad de los focos de luz hay que distinguir ciertas circunstancias, de las cuales unas son inherentes á los focos mismos, y otras peculiares de los objetos alumbrados por ellas, como por ejemplo la distancia, la inclinacion, etc. Los problemas relativos á esta clase de apreciaciones son los que constituyen la parte de la Optica llamada *Fotometría*, voz derivada de otras dos griegas que significan *luz* y *medida*.

No hay nada tan delicado ni difícil como la medicion de las intensidades luminosas. A pesar de todos los progresos realizados en la óptica, todavía se carece de instrumentos á propósito para medirlas con una exactitud comparable á la de los otros elementos físicos. El barómetro y el termómetro marcan con extraordinaria sensibilidad la presion atmosférica y la temperatura: sábese apreciar con delicadeza suma la altura relativa de dos sonidos; pero la fotometría dista mucho de haber adelantado tanto, y la comparacion de las intensidades luminosas de dos luces deja aún mucho que desear. ¿De qué procede esta inferioridad? De que con respecto á este asunto no tenemos otro medio de apreciacion sino el órgano con el cual percibimos la luz. La sensacion de la vista es el sólo juez en esta cuestion, y á pesar de su gran sensibilidad, el ojo es poco apto para decidir acerca de las relaciones numéricas de dos ó muchas luces que se hallan simultánea ó sucesivamente ante él.

Esta dificultad no es menor áun en el caso de tener que juzgar de la identidad de dos focos. Si las observaciones no son simultáneas, la comparacion será tanto más difícil cuanto más tiempo trascurra entre ellas. Así, pues, ante todo es preciso hacer de modo que se observe las dos luces al mismo tiempo, cosa no siempre posible (1). Las más de las veces el brillo de los focos deslumbra, hiere la vista, la incapacita para juzgar con alguna precision, y por esta razon los físicos, en lugar de comparar los focos mismos entre sí, observan superficies de igual naturaleza, alumbradas por esos focos en las mismas condiciones de inclinacion y de distancia. Finalmente, hay otra causa de incertidumbre de la cual no parece fácil eximirse, y es la diversidad de los colores de las luces que se ponen frente á frente. «Entre dos luces de diferentes colores, dice J. Herschel, no se puede establecer ningun paralelo susceptible de precision; y la incertidumbre de nuestro juicio es tanto mayor cuanto más lo es esta diferencia de coloracion.»

A pesar de todas estas dificultades, se ha conseguido formular, ya por el raciocinio ó bien por la experiencia, unos cuantos principios que han sugerido la invencion de varios aparatos fotométricos de los cuales describiremos los más notables. Hoy, que el alumbrado público ó privado ha adquirido tan considerable extension, hoy, que se siente la necesidad de auxiliar la navegacion por las costas haciendo llegar á la mayor distancia posible la luz de los faros, los fotómetros son instrumentos de gran utilidad práctica; pero los primeros procedimientos ideados para comparar focos de luz debiéronse á personas entendidas que solamente tenian en consideracion la parte científica del problema. Auzout y Huygens en el siglo XVII, Andrés Celsio, Bouguer y Wollaston en el siguiente, trataron de determinar el brillo relativo de las luces de los astros, por ejemplo, la intensidad de la luz del Sol, comparada con la de la Luna ó con la de las estrellas más brillantes.

El primer principio que formularon fué el siguiente: Cuando varía la distancia de un punto luminoso al objeto alumbrado por él, la intensidad que emana de este punto varía *en razon inversa del cuadrado de la distancia.* Y en efecto, el punto luminoso irradia luz en todos sentidos con igual fuerza; pero estos rayos divergen más y más conforme va aumentando la distancia. Si se detienen en la superficie de una esfera de cierto radio, producirán en un elemento *m* (fig. 171) de esta esfera una iluminacion de determinada intensidad; si, prosiguiendo su camino, se detienen en una esfera de doble radio, los mismos rayos que se difundian por la superficie *m*, se difundirán por la M de la nueva esfera. Ahora bien; la geometría nos enseña que M es cuatro veces tan extensa como *m*, y siendo la misma la cantidad de luz que se difunde por una superficie cuatro veces mayor, síguese de aquí que su intensidad será igual número de veces menor. A triple distancia, esta será nueve veces menor. Por lo general, disminuye á la par que aumenta el cuadrado de la distancia.

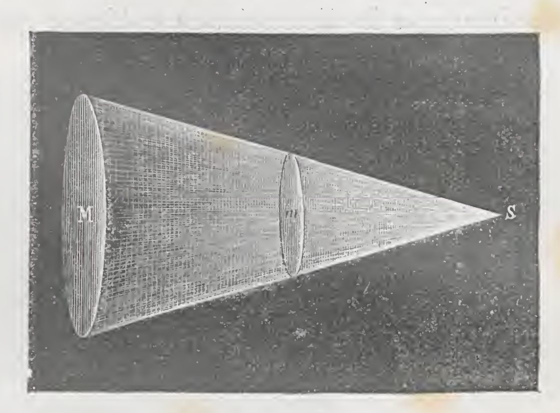


*Fig. 171.* — Ley del cuadrado de las distancias

Por lo demás, esta ley sólo es verdadera en cuanto se hace abstraccion de la absorcion de los rayos luminosos por los medios en que se mueven. Pero tambien es aplicable en el caso de que el foco de luz no sea ya un simple punto luminoso y presente una superficie aparente apreciable, con tal que esté á bastante distancia del objeto alumbrado para que se le pueda considerar situado á distancia igual de todos los puntos del foco.

(1) «Tan poco puede servir el ojo para medir la luz, dice J. Herschel en su *Tratado de la luz*, como la mano para apreciar el peso de un cuerpo cogido al azar. Y esta incertidumbre aumenta á causa de la naturaleza misma del órgano que se halla en un estado de fluctuacion continua motivada por la abertura mayor ó menor de la pupila que se contrae ó dilata por la excitacion de la luz misma, y causada tambien por la sensibilidad variable de los nervios ópticos. Compárese el brillo deslumbrador de un relámpago en una noche oscura con la sensacion producida en pleno dia por el mismo fenómeno; en el primer caso, el ojo sufre una impresion desagradable, y la agitacion violenta que experimentan los nervios ópticos de la retina subsiste algun rato despues, haciéndonos ver una sucesion rápida y alternativa de luz y oscuridad. De dia no produce este efecto un relámpago, y podemos observar los trazos sinuosos del rayo con mayor facilidad, y sin que nos moleste ese resplandor prodigioso que tan vivamente hace resaltar la oscuridad que precede y sigue al rayo.»

De este primer principio de fotometría resulta que si se pone ante la luz de una vela un pedazo de papel blanco, por ejemplo, y se le va retirando á distancias dos, tres ó cuatro veces mayores, el resplandor del papel será cuatro, nueve ó diez y seis veces menor; mas para esto es menester que el papel esté siempre colocado perpendicularmente á la direccion de los rayos luminosos. Si se inclina el papel en esta direccion sin variar la distancia, es evidente que el resplandor disminuirá, puesto que la misma superficie interceptará un número menor de rayos. La cantidad de luz recibida varía entónces con arreglo á una ley llamada *ley de los cosenos*, porque es proporcional á los cosenos de los ángulos que la direccion de los rayos luminosos forma con la perpendicular á la superficie alumbrada.

En todo cuanto acabamos de decir sólo se trata de la potencia iluminadora del foco de luz, no de su brillo intrínseco. Si este último no varía, claro es que dicha potencia será tanto mayor cuanto mayor sea la superficie del foco, del propio modo que en el caso de que el brillo intrínseco aumentara, la potencia iluminadora aumentaria en la misma proporcion.

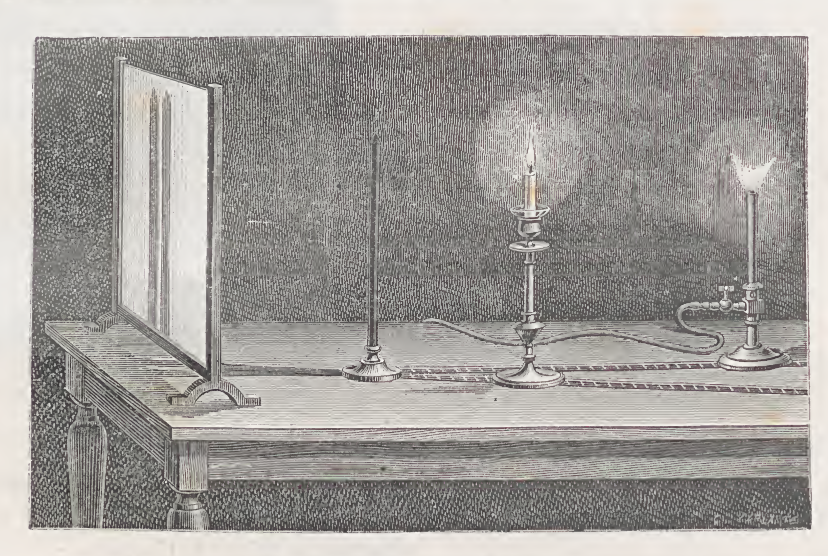


*Fig. 172.*—Fotómetro de Rumford

Una consecuencia de los principios que preceden es que cualquier foco luminoso conserva el mismo brillo intrínseco aparente cualquiera que sea la distancia á que se encuentre de nuestra vista. A decir verdad, la cantidad de luz que penetra por la abertura de nuestra pupila, disminuye en razon inversa del cuadrado de la distancia. Pero, como emana de una superficie luminosa cuyo diámetro aparente es cada vez más pequeño y que decrece en razon directa del cuadrado de esta misma distancia, hay compensacion exacta, y el brillo subsiste por igual en cada uno de los puntos de la superficie. Esta es la razon de que la luz de los planetas, como Vénus, Marte, y Júpiter, nos parece siempre tan viva cuando los vemos á una misma altura sobre el horizonte, con tal que la pureza de la atmósfera sea tambien la misma, áun cuando sus distancias á la Tierra sean muy variables. El Sol se ve desde los diferentes planetas, de Mercurio á Neptuno, en forma de disco cuya superficie aparente varía de 1 á 7,000 próximamente; la cantidad de luz que recibe cada uno de estos cuerpos cambia pues en la misma proporcion; pero el brillo intrínseco del disco es el mismo en Mercurio que en Neptuno, suponiendo que los espacios celestes no absorban la luz, y que, en su paso al través de las atmósferas de los dos planetas, experimente el mismo grado de extincion (1).

Nadie ignora que si se mira una bala roja en la oscuridad, no se percibe su forma esférica; créese ver un disco plano cuyas partes todas presentan la misma intensidad luminosa. Si, en lugar de una bala esférica es una barra de hierro ó de plata bruñida y de forma prismática calentada al rojo, ocurrirá un fenómeno análogo. Cualquiera que sea la posicion de esta barra, no se ven sus aristas, el resplandor es por todas partes igual, lo mismo en las caras

(1) Seria preferible decir que este brillo intrínseco es el mismo en el límite exterior de la atmósfera de cada planeta.

que se presentan perpendicularmente á la vista que en las que están más ó ménos inclinadas; en una palabra, parecerá que se ve una placa enteramente plana. Si se da vuelta á la barra, no se conocerá este cambio sino por la variacion aparente de la anchura de la cinta luminosa.

¿Qué debe deducirse de estos experimentos? Que la cantidad de luz emitida por un cuerpo sólido incandescente en direccion determinada depende de la inclinacion de su superficie sobre la direccion de los rayos luminosos. En efecto, si dos elementos iguales tomados, uno en el lado de la barra metálica que da frente á la vista del observador, y otro en una cara inclinada, emitieran en esta direccion la misma cantidad de luz, es evidente que la cara inclinada será la que parezca de mayor brillo, puesto que el mismo número de rayos estará distribuido en una área cuya magnitud aparente será menor. El Sol es una esfera luminosa; pero el aspecto que presenta es el de un disco plano, cuyo brillo intrínseco no es mayor en los bordes que en el centro (1), lo cual confirma la ley que acabamos de enunciar y que se llama tambien *ley de los cosenos*, porque la cantidad de luz emitida por elementos iguales de la superficie de un foco varía como los cosenos de los ángulos que forman los rayos con la perpendicular á la superficie.

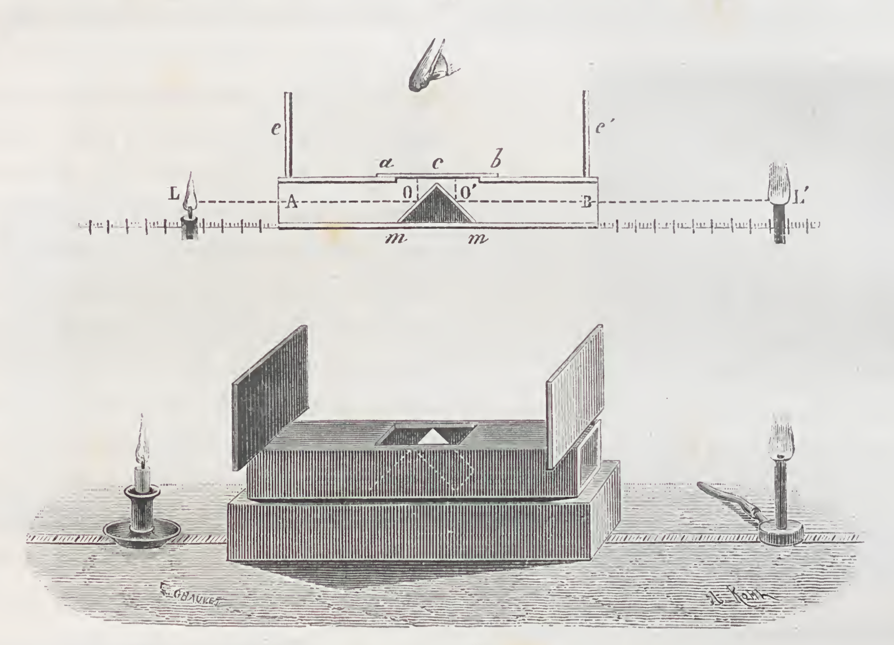


*Fig. 173.*—Fotómetro de Ritchie.—Corte y vista exterior

## II

### PROCEDIMIENTOS FOTOMÉTRICOS

Tales son los principios en que se basan los físicos para valuar la potencia lumínica ó bien el brillo intrínseco de los focos de luz. Antes de describir los aparatos que sirven para medir estas intensidades y que se llaman *fotómetros*, conviene decir cuál es la *unidad luminosa* generalmente adoptada. La eleccion de esta unidad no es tan fácil como pudiera creerse, á lo ménos si se exige que llene rigurosamente la condicion esencial de *subsistir siempre idéntica á sí misma*. Como observa con razon M. Becquerel, aún no está resuelta esta cuestion de la que tanto se han ocupado los físicos. En sus experimentos fotométricos, tomaba Bouguer por unidad de poder lumínico la luz de una vela ó de una bujía; pero la intensidad de semejante luz depende de la pureza de la materia de que está formada, de sus dimensiones y de las de la mecha (2). Especificando la composicion y el peso de la materia consumida, tomando por ejemplo como unidad la luz de una bujía esteárica que queme *diez gramos en una hora*, se realiza sobre

(1) Hoy está probado que las partes centrales del disco solar son las más luminosas, al contrario de lo que deberia ser si hubiera igualdad en la emision de la luz en toda la superficie. Los astrónomos han deducido de aquí que el astro está rodeado de una atmósfera absorbente.

(2) Segun Rumford, representando por 100 la intensidad de la luz de una vela bien despabilada, queda reducida á 39 á los 11 minutos; 19 minutos despues sólo llega á 23, y baja hasta 16 cuando se la deja arder 29 minutos sin despabilarla.

poco más ó ménos la condicion de identidad de que más arriba hemos hablado.

Hoy se ha convenido en tomar por unidad para los experimentos fotométricos la luz de la lámpara Carcel, que quema 42 gramos de aceite de colza refinado por hora, y cuya mecha tiene tres centímetros de diámetro. De los experimentos comparativos hechos resulta que la potencia lumínica de esta luz equivale á 8 ó 9 veces la de una bujía esteárica que queme 10 gramos.

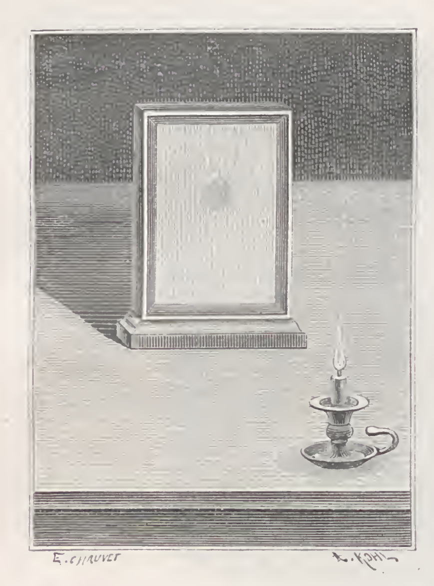


*Fig. 174.*—Fotómetro de Bunsen; mancha vista por reflexion.

La figura 172 representa el fotómetro de Rumford, el cual está basado en la circunstancia de que, si las sombras que produce en una misma pantalla un cuerpo opaco alumbrado por dos luces diferentes son de igual intensidad, las potencias lumínicas de estas dos luces son iguales, cuando estas se hallan situadas á la misma distancia de la pantalla, ó están en razon inversa de los cuadrados de estas distancias cuando se encuentra una luz más apartada que otra.

Supongamos que se quiera comparar las intensidades luminosas de una luz de gas y de una bujía ordinaria. Para ello se colocará verticalmente delante de una pantalla de papel blanco una varilla negra cilíndrica, y se situarán las dos luces de modo que las dos sombras de la varilla se proyecten sobre el papel casi una junto á otra. Hecho esto, se aparta poco á poco la luz que dé la sombra más intensa, hasta que no se note diferencia entre las intensidades de las sombras. Para juzgar mejor de la igualdad de estas, se mira la pantalla por la cara opuesta á la iluminada directamente por ambas luces; en este momento, las partes luminosas de la pantalla reciben los rayos de las dos á la vez al paso que cada sombra sólo está iluminada por una de ellas; y por consiguiente, la igualdad de sus tonos indica la de las iluminaciones de la pantalla por cada foco de por sí, estando entónces las intensidades luminosas de estos focos en razon inversa de los cuadrados de sus distancias á la pantalla.

El fotómetro de Ritchie (fig. 173) consiste en un tubo dado interiormente de negro, que lleva en su parte media dos espejos *m m'*, con una inclinacion de 45°, pero en sentido contrario. La cara superior del tubo tiene, enfrente de los espejos, una abertura que se tapa con una lámina tenue diáfana *a c b*, por ejemplo, con una hoja de papel untada de aceite. Las dos luces que se han de comparar están situadas á uno y otro lado de modo que cada una de ellas envie un haz luminoso al espejo correspondiente. La reflexion despide verticalmente estos haces, uno sobre la mitad *a c* y otro sobre la *c b* de la lámina, y entónces se aparta la luz más viva hasta que la vista juzgue que las dos mitades están alumbradas por igual. Tomando la

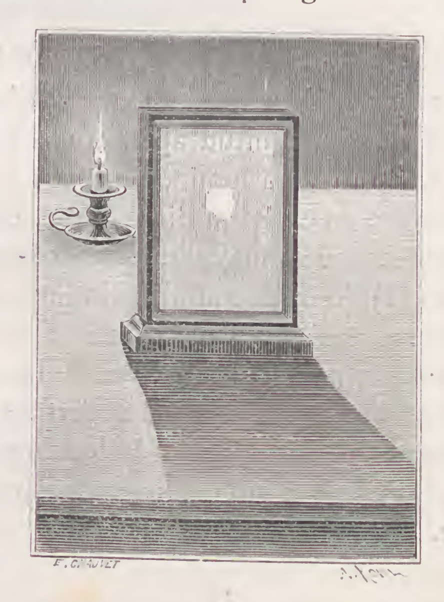


*Fig. 175.*—Mancha vista por trasparencia

razon inversa de los cuadrados de las distancias L O, L' O', se tiene la de las intensidades luminosas de las dos luces. A veces se sustituyen los espejos por dos cartones blancos, supriméndose entónces la lámina diáfana que tapa la abertura *ab*.

Si se hace una mancha en una hoja de papel blanco con una gota de cera ó de ácido esteárico,

y se extiende la hoja sobre un marco, se tiene el sencillo fotómetro de Bunsen. Cuando se alumbra una cara de la hoja, esta cara, vista directamente por reflexion, presenta una mancha oscura sobre fondo luminoso; vista por el otro lado por trasmision ó sea al trasluz (fig. 175), la presenta clara sobre fondo oscuro. Si dos luces de intensidad desigual alumbran á la vez las dos caras del cuadro, la mancha parecerá oscura del lado del foco más luminoso, y clara del lado del más débil. Por último, si las luces son de igual intensidad ó si la más fuerte está á una distancia que compense esta desigualdad, la mancha desaparecerá; y la hoja de papel parecerá uniformemente iluminada. Con dos espejos que tengan la misma inclinacion á cada lado del marco se puede juzgar simultáneamente de la desaparicion de la mancha de las dos caras de la hoja.

El fotómetro de Bouguer (fig. 177) está basado en la igualdad de brillo de dos porciones de una misma superficie alumbradas separadamente por cada foco. Una pantalla opaca impide que la luz del uno llegue á la parte de superficie iluminada por el otro. Esta superficie es una hoja de papel dada de aceite ó un cristal raspado. Leon Foucault empleaba con preferencia una placa de porcelana muy homogénea y bastante delgada para ser diáfana. Las dos porciones alumbradas aisladamente sólo están separadas por una estrecha línea de sombra producida por la pantalla, ó (fig. 178) por una línea luminosa que marca el espacio iluminado á la vez por ambos focos. En uno y otro caso, el ojo situado detrás puede apreciar fácilmente el momento en que hay igualdad de brillo, obtenida la cual, se deducen las intensidades luminosas de sus distancias á la placa de porcelana.

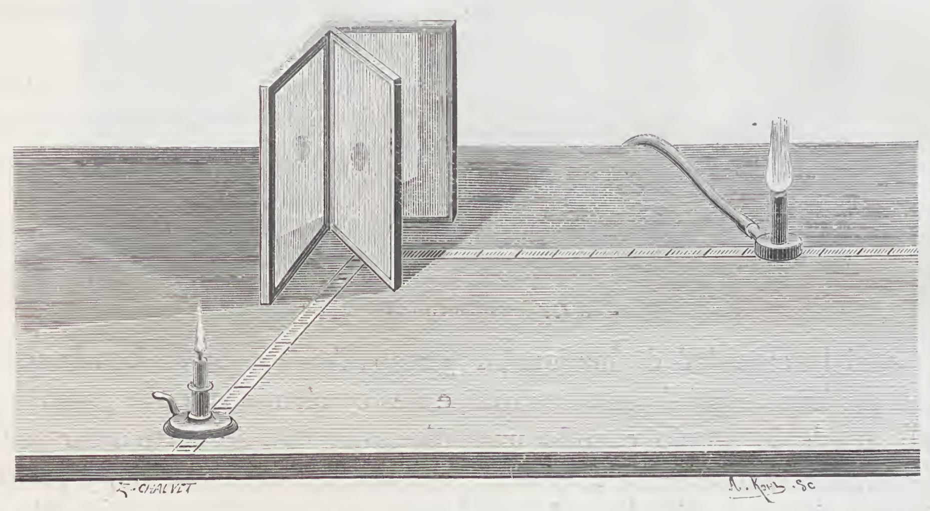


*Fig. 176.*—Experimento con el fotómetro de Bunsen

Nos limitaremos á la descripcion de esta clase de fotómetros, que pueden servir para comprobar la ley del cuadrado de las distancias. Esta comprobacion es muy sencilla; basta poner por una parte una sola bujía, y entónces se ve que es preciso poner cuatro á doble, y nueve á triple distancia para obtener ó la igualdad de sombras en la pantalla, ó la de las partes iluminadas de la placa de porcelana (1).

Si se emplean dos luces iguales, dos bujías por ejemplo, y se pone una de ellas ocho veces más léjos de la pantalla que la otra, vése que la sombra proyectada por la primera desaparece. A esta distancia la intensidad luminosa es 64 veces menor que la otra. Bouguer, que hizo este experimento, deduce de él que nuestra vista

(1) Debemos por lo ménos hacer aquí mencion de los experimentos efectuados por Arago para establecer un método fotométrico con un aparato de su invencion. El ilustre físico basó este método en la ley formulada por Malus que regula la intensidad de las imágenes dadas por un haz de luz polarizada, cuando se cambia entre 0° y 90° el ángulo de las secciones principales de los cristales birefringentes, polarizador y analizador. Estas intensidades varían como los cuadrados de los cosenos del ángulo, diciéndose por abreviacion *la ley de los cosenos cuadrados*. Arago empezó por comprobar experimentalmente la exactitud de esta ley, y para conseguirlo, comparó con su fotómetro la luz reflejada por una lámina de caras paralelas con la luz trasmitida por la misma lámina para incidencias iguales. Advirtió que cuando un haz de luz es en parte reflejado, y en parte trasmitido por una sustancia trasparente, no hay pérdida de luz en esta doble operacion. Advirtió tambien que no se extingue luz alguna en la reflexion total, segun lo habia creido y afirmado Bouguer. Tan luégo como Arago hubo demostrado la ley de Malus, valióse de ella para el estudio de varias cuestiones de fotometría astronómica, por ejemplo para comparar la intensidad luminosa de los bordes del disco solar con la del centro, para medir las intensidades de las luces estelares, etc.

no puede percibir una luz de cualquier intensidad en presencia de otra luz 64 veces más fuerte. Esto explica por qué las estrellas son invisibles de dia, por qué desde una habitacion muy iluminada no vemos de noche por las ventanas nada de lo que pasa fuera, y por qué, cuando el Sol brilla en todo su explendor, no vemos desde la calle lo que hay en una habitacion.

El experimento de Bouguer no estaba completo. En efecto, si la cantidad de luz igual á un 64.° la llega á ser imperceptible en el caso de inmovilidad, no sucede lo propio cuando una de las luces se mueve con relacion á la otra. Fácil es cerciorarse de ello valiéndose de una prueba familiar parecida á la que Arago cuenta en estos términos: «Me paseaba al medio dia, dice, andando de norte á sur por la azotea meridional del observatorio, y por lo tanto toda la parte del embaldosado situado al sur de mi cuerpo estaba alumbrado de lleno por la luz directa del Sol; pero las vidrieras de las ventanas de los establecimientos situados á mi espalda reflejaban los rayos del astro; habia pues una imágen secundaria, una especie de sol artificial puesto al norte, cuyos rayos, viniendo á mi encuentro, debian formar una sombra dirigida de norte á mediodía. Naturalmente, esta sombra era muy débil, puesto que la iluminaba la luz directa del Sol, y por consiguiente sólo se la podia advertir comparando dicha luz directa con la situada al lado, compuesta de esta misma luz directa y de los rayos, bastante débiles, reflejados por las vidrieras. Pues bien, si yo permanecia inmóvil, no se veia ningun indicio de sombra; si hacia un ademan con los brazos ó un movimiento brusco con el cuerpo produciendo un desvío perceptible de la sombra, al punto se notaba la imágen de los brazos ó del cuerpo.»

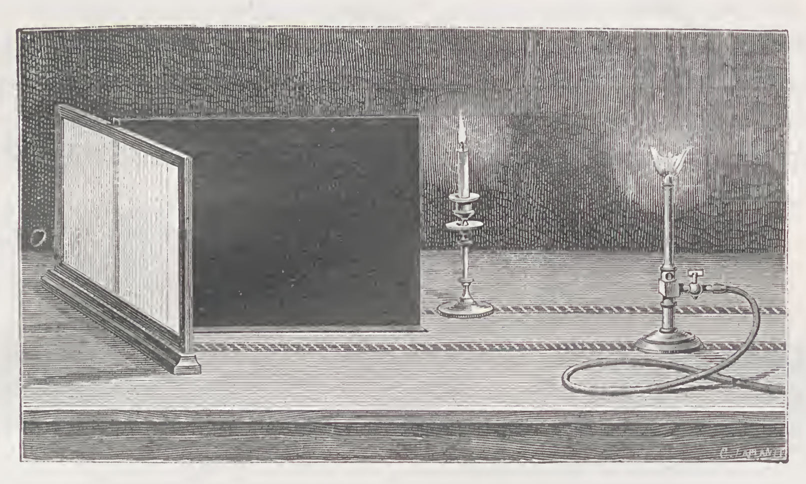


*Fig. 177.*—Fotómetro de Bouguer

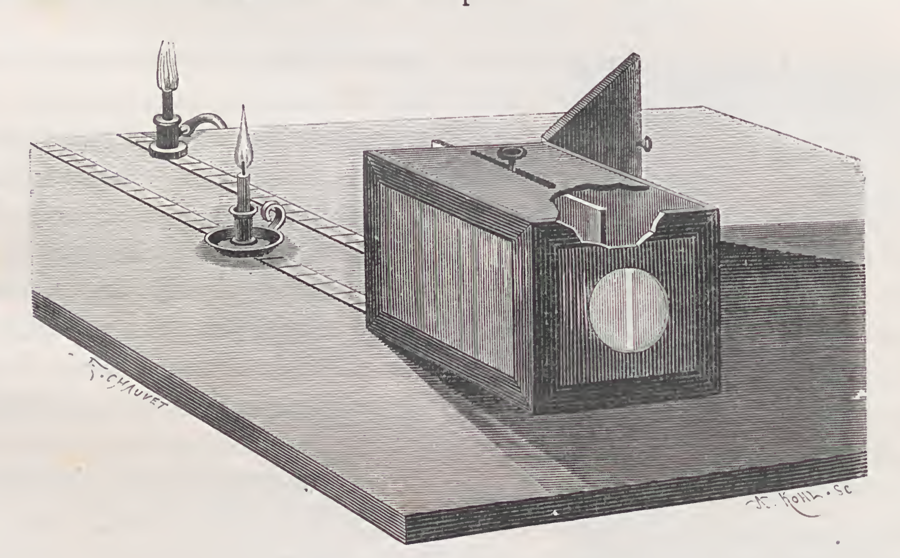


*Fig. 178.*—Fotómetro de Leon Foncault

Con los anteojos de gran amplificacion se ve cómo se desvian rápidamente las estrellas en virtud del movimiento diurno, observacion que puede hacerse tanto de dia como de noche, procediendo principalmente esta visibilidad en pleno dia de que subsiste la intensidad del punto luminoso, sea cualquiera la amplificacion, al paso que el campo del anteojo en que dicho punto se proyecta, se oscurece á causa de esta misma amplificacion. Arago creia que la movilidad de la estrella en el campo visual debia contribuir á esta visibilidad, pero Bessel no admitia semejante influencia.

Bouguer y Wollaston han tratado cada uno de por sí de comparar la luz del Sol con la de la Luna llena, tomando por término de comparacion la luz de una bujía, y ambos han deducido que la luz del Sol equivale á las luces reunidas de unas 5,600 velas situadas á 30 centímetros de distancia. La de la Luna es, segun Wollaston, igual á la 144.ª parte de la de una vela colocada á $3^{m}$,65, de lo cual ha deducido, en virtud de un cálculo fácil, que la luz del Sol viene á ser igual á 800,000 veces la de la Luna llena, cifra que sólo llega á 300,000 en concepto de Bouguer. Arago añade refiriéndose á la cantidad deducida por Wollaston y que difiere tanto de la del físico francés: «No puedo decir en qué consiste la enormidad de este número comparado con el de Bouguer, porque el método empleado era exacto y la observacion de incontestable habilidad.» ¿Qué deberemos deducir de esto sino que hay que estudiar de nuevo el problema?

# CAPITULO XVII

## EL OJO Y LA VISION

### I

### DESCRIPCION DEL ÓRGANO DE LA VISTA EN EL HOMBRE

Todos los numerosos y variados fenómenos que acabamos de describir se refieren á la propagacion de la luz en diferentes medios y á las modificaciones que sufre, ya por lo que á su intensidad se refiere ó ya por lo que respecta al color, cuando se cambian las condiciones del curso seguido por los rayos luminosos. Hasta aquí apénas hemos tenido en cuenta el modo cómo afectan á nuestros órganos todos estos fenómenos, ni la marcha que la luz sigue cuando cesa de pertenecer, por decirlo así, al mundo exterior para convertirse en fenómeno interno.

¿Cómo se efectúa este paso? ¿Qué trasformacion media para que un movimiento vibratorio, como el de las ondas del éter, llegue á producir la sensacion de la vista en el hombre y en los animales? ¿En qué consiste que ciertas variaciones en la amplitud ó velocidad de las vibraciones originen cambios correspondientes en la intensidad de la luz y en los colores de los cuerpos? Cuestiones son estas no resueltas en su totalidad por la ciencia, y que más bien pertenecen al dominio de la fisiología que al de la física.

Lo que se sabe, lo que la observacion ha permitido estudiar de un modo positivo, es la marcha de los rayos luminosos en el ojo, desde el momento en que penetran en este órgano hasta el en que, llegando á los nervios, se trasmite al cerebro la sensacion que producen, determinando en él la sensacion de la vista. En este trayecto, los rayos luminosos obedecen á las conocidas leyes de la propagacion de la luz en medios de forma y densidad variables; en este asunto sólo se trata de fenómenos de simple refraccion.

El ojo no es ni más ni ménos que una cámara oscura, cuyo orificio lleva en su parte anterior un vidrio trasparente y en la posterior una lente, y cuyo fondo está cubierto por una membrana que sirve de pantalla en la cual se estampan, pero al revés, las imágenes de los objetos externos. Describamos algo detalladamente este admirable órgano.

El ojo humano está, como es sabido, encajado en una cavidad del cráneo llamada *órbita*;

su forma es la de un globo casi esférico, rodeado completamente por una membrana dura y consistente que por su semejanza con el cuerno ha recibido el nombre de *córnea.* La córnea se divide en dos segmentos de desigual extension: el más pequeño A, colocado en la parte anterior del ojo, es de curvatura mucho más marcada que el segmento posterior; parece un cristal de reloj que forma cuerpo con el globo del ojo: además es perfectamente trasparente é incoloro, al paso que el otro segmento H es opaco y de color blanco-azulado. Se los distingue con los nombres de *córnea trasparente* y *córnea opaca,* constituyendo esta última, que no es trasparente, sino tan sólo diáfana para las luces de gran intensidad, lo que vulgarmente se llama el *blanco del ojo.*

Al través de la córnea trasparente se ve una

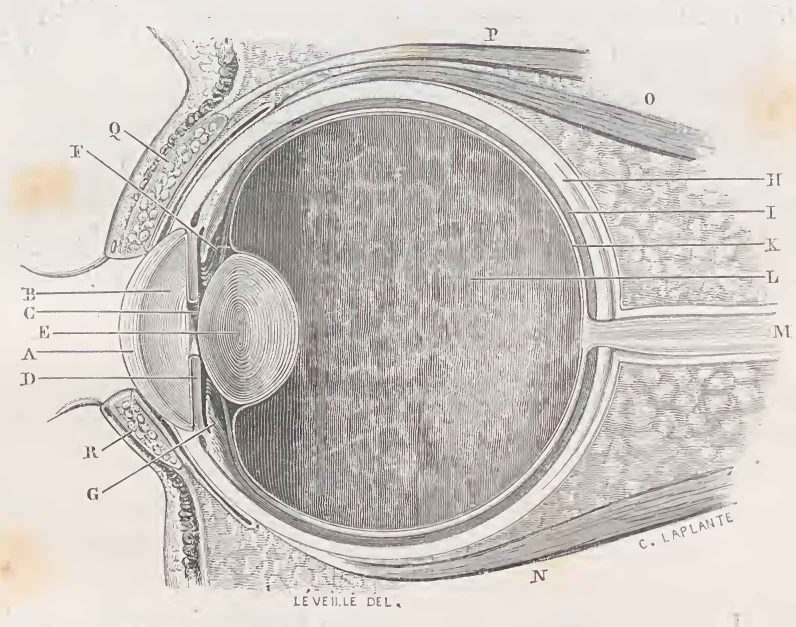



*Fig. 179.*—Seccion diametral antero-posterior del ojo humano

membrana circular, cuyo color varía segun las personas ó las razas, siendo gris, azul claro ú oscuro, ó pardo-amarillento. Esta membrana D es el *íris,* especie de diafragma que tiene en su centro un orificio circular tambien, en el hombre al ménos, y á cuya abertura se da el nombre de *pupila.* Detrás de la pupila, que desempeña las veces del orificio de la cámara oscura, por la cual penetra en el ojo la luz exterior, hay una lente sólida E que es el *cristalino,* cuya cara anterior presenta una curva ménos pronunciada que la superficie interna. El cristalino divide la cavidad del ojo en dos partes ó cámaras de dimensiones muy desiguales, como puede verse en la figura 179. La cámara anterior B, comprendida entre la córnea trasparente y el cristalino, está llena de un líquido muy parecido al agua pura y dotado poco más ó ménos de igual poder refringente que esta, líquido llamado *licor acuoso.* Entre el cristalino y el fondo del ojo se encuentra la cámara posterior, llena por completo de una sustancia trasparente, incolora, de consistencia gelatinosa y algo más refringente que el agua; es el *humor vítreo* L.

Así, pues, al penetrar un rayo de luz en el ojo, atraviesa la serie de medios refringentes que vamos á enumerar, ántes de llegar al fondo del órgano; la córnea trasparente, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. En cada uno de estos medios sufre una refraccion particular, siendo tal el conjunto de sus desviaciones, que su foco va á formarse en la membrana que reviste la cámara posterior del ojo.

Conviene decir aquí que toda la superficie interna de la córnea opaca ó *esclerótica,* como se dice en anatomía, está cubierta por una membrana delgada, la *coroides* I, cuya parte cóncava está tapizada de un pigmento negro propio para absorber la luz (1).

Todas las partes del ojo que acabamos de

(1) Este mismo pigmento que tapiza el íris, y cuyo espesor varía, es el que produce el color más ó ménos oscuro de los ojos. Cuando la capa de pigmento es muy delgada los ojos son azules ó garzos; cuando es más gruesa da lugar á un color mas oscuro, y cuando falta dicho pigmento resulta la particularidad que ha hecho designar á los individuos que carecen de él con el nombre de *albinos.*

describir son las que contribuyen á la formacion de las imágenes de los objetos; siendo sus funciones, por decirlo así, pasivas. En el punto mismo en que se producen estas imágenes, tiene efecto la impresion de la luz sobre la parte sensible del ojo. Veamos cuál es la disposicion de esta parte que tan importante papel desempeña en el fenómeno de la vision. Detrás del globo del ojo, la coroides y la córnea opaca tienen un agujero circular por el cual pasa el haz de nervios ópticos. Al llegar este haz M al interior del ojo, se dilata y extiende por toda la superficie de la coroides, formando una membrana que está en contacto directo con el humor vítreo, y que es la *retina* K, pantalla sensible de la cámara oscura del ojo.

A corta distancia del punto de insercion de los nervios ópticos, hay en la retina una mancha de color amarillento (*macula lutea)* que tiene gran importancia en la vision, por cuanto en ella es donde se forma siempre la imágen del punto ú objeto en el cual fijamos la vista: es el sitio de la vision más distinta. El ojo del hombre y el del mono son los únicos cuya retina tiene esta mancha amarilla. Las partes contiguas á la retina están dotadas de menos sensibilidad, y sobre todo no gozan en el mismo grado que la mancha amarilla de la facultad de distinguir dos impresiones producidas en puntos muy inmediatos. Hay además otro punto en que esta sensibilidad desaparece por completo: y en efecto, toda la parte del fondo del ojo que corresponde á la entrada del nervio óptico es insensible á la luz. Esta parte es lo que se llama *punto ciego* ó *punctum cæcum*, demostrándose por medio de experimentos muy sencillos la existencia de esta region de insensibilidad de la retina.

Uno de ellos se debe al físico Mariotte, y consiste en marcar en un plano vertical, por ejemplo en una pared, una serie de puntos trazados á igual distancia unos de otros. Si el observador se sitúa enfrente de la línea de puntos y contempla uno de ellos cerrando el ojo izquierdo, ve claramente el punto que mira, pero los demás confusamente.

Separándose entónces de la pared, sin apartar la vista del primer punto, llega un momento en que el segundo es invisible, pero á distancia algo mayor aparece de nuevo. En seguida sucede otro tanto con el tercer punto, luégo con el cuarto, y así sucesivamente con toda la serie. La desaparicion de cada punto se efectúa siempre en el momento en que la distancia del ojo á la pared es casi triple (para ciertas vistas cuádruple) de la que media entre el punto que desaparece del primero de la serie, y el que mira con el ojo derecho. Mirando con el izquierdo, seria preciso contemplar el último punto de la derecha. Este mismo experimento puede hacerse de otro modo, limitándose á trazar dos puntos ó círculos.

Trázanse sobre fondo negro dos circulitos blancos ó un círculo y una cruz, separados unos 6 centímetros. Se cierra un ojo, por ejemplo el izquierdo, y con el derecho se mira la cruz con toda fijeza. El observador se aparta ó se retira en seguida poco á poco hasta que la distancia del ojo derecho á la cruz sea un poco más de cuatro veces mayor que el intervalo que media entre ésta y el círculo blanco. En tal momento, este círculo desaparece, y el fondo negro parece continuo. Para que la prueba salga bien, es preciso mirar con toda fijeza la cruz blanca (1).

Es fácil de comprender la marcha de los rayos de luz que emanan de un objeto AB, y de qué manera va este objeto á formar su imágen en la retina. El sistema lenticular compuesto de la córnea trasparente y del cristalino, separados por el humor acusso, tiene por centro óptico un punto O, situado algo hácia atrás del cristalino (fig. 180). Si se trazan los ejes secundarios AO BO, los haces emanados de los puntos A y B convergen en su prolongacion y en el punto en que encuentran la retina, y los puntos intermedios forman sus imágenes entre los puntos *a* y *b*: por lo tanto, la imágen del objeto *b a* será invertida. Este resultado es una consecuencia de las leyes de la refraccion y de

(1) Helmholtz describe como sigue un procedimiento merced al cual cualquiera puede determinar fácilmente la forma y las dimensiones aparentes del *punctum cæcum:* «Se da al ojo, dice, una posicion fija, á 8 ó 12 pulgadas de una hoja de papel blanco, en la cual se haya trazado una crucecita que sirva de punto de mira. Luégo se hace correr sobre el papel, en la proyeccion del *punctum cæcum*, la punta mojada de tinta de una pluma blanca ó al ménos poco oscura; esta punta desaparece de la vista; alejando la pluma sucesivamente, en distintas direcciones, se marca cada vez el punto en que empieza á ser visible. Para designar el tamaño aparente que la mancha ciega ocupa en el campo visual, diremos que podrian ponerse en fila once lunas llenas sin traspasar su diámetro, y que á seis ó siete piés de distancia, puede desaparecer en él por completo una figura humana. *(Optica fisiológica)*.

la marcha de los rayos en las lentes; pero tambien se ha podido comprobar el hecho por la observacion directa: tomando el ojo de un animal recien muerto, y quitándole las capas de grasa que envuelven exteriormente el globo, puede adelgazarse la córnea opaca por su parte posterior hasta que queda traslúcida; preparado el ojo de esta suerte y expuesto á la luz del dia, deja ver por trasparencia la imágen reducida y muy clara de los objetos externos; tambien se puede ver la imágen invertida de una bujía al través de la córnea de los animales albinos, córnea que es naturalmente traslúcida por la falta de pigmento colorante.

Hemos dicho que el íris desempeña las funciones de un diafragma que no deja penetrar en el ojo sino los conos de luz que tienen por base la abertura de la pupila; pero el íris se puede contraer ó dilatar espontáneamente, por manera que la pupila se reduce ó se agranda. Este movimiento automático se produce en el primer sentido cuando crece el resplandor de la luz que recibe el ojo, y se efectúa en sentido contrario cuando este resplandor mengua. Lo mismo sucede cuando el ojo contempla objetos situados á varias distancias; la pupila se dilata cuando se miran los lejanos, y se contrae cuando la vista se fija en los próximos. Esto puede comprobarse con un espejo que se tiene en la mano y en el cual se fija la mirada; á cierta distancia se examina el diámetro de la pupila, y aproximando luégo rápidamente el espejo sin dejar de mirar la pupila, se observa que ésta se contrae con lentitud.

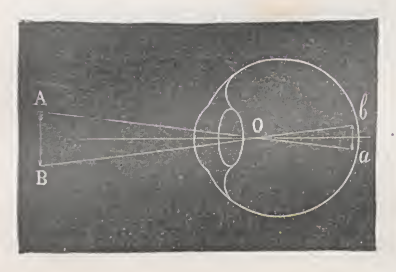



*Fig. 180.*—Formacion de las imágenes en un ojo normal

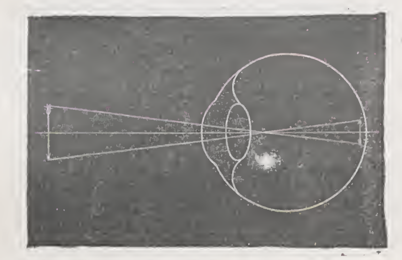


*Fig. 181.*—Formacion de la imágen en el ojo de un présbite

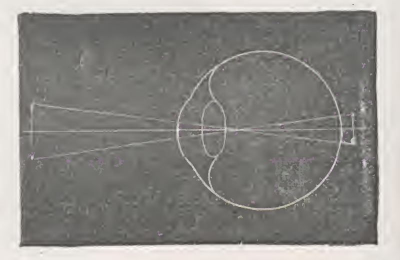


*Fig. 182.*—Formacion de la imágen en el ojo de un míope

Asimilado el ojo á un sistema de lentes, puede parecer raro que sirva para ver con claridad tal profusion de objetos situados á distancias tan variables. Es indudable que para que la vision sea distinta, la imágen del objeto ha de pintarse con claridad en la misma retina, y por consiguiente es preciso que al cambiar la distancia pueda cambiar asimismo el foco, de manera que coincida siempre con la superficie de la membrana nerviosa. En efecto, si se pinta la imágen distinta de un punto luminoso, ya sea delante ó ya detrás de la retina, sucede lo mismo que se observa con una lente convergente cuando se recibe la imágen delante ó detrás del foco correspondiente, esto es, que en lugar de un punto claro y definido, se ve un círculo difuso. De aquí resulta «que no podemos ver distintamente y á la vez varios objetos situados á diferentes distancias del ojo.» Para convencerse de ello, dice Helmholtz, basta poner á unas seis pulgadas del ojo un velo ó cualquier otro tejido trasparente; y más léjos, como á dos piés de distancia, un libro. Cerrando un ojo para simplificar el experimento, es fácil cerciorarse de que se puede mirar como se quiera, ya los hilos del velo ó ya las letras del libro, y verlas claramente, pero tambien se nota que las letras se tornan confusas cuando se miran los hilos del velo, y que si se contemplan aquellas, el velo aparece como un oscurecimiento ligero y uniforme del campo visual. Si, sin cambiar la direccion de la vista, se examina, ora el objeto próximo, ora el más apartado, nótase que á cada una de estas alternativas el ojo hace un esfuerzo para efectuar el cambio.» *(Optica fisiológica.)*

Este hecho se expresa diciendo que el ojo se acomoda á las distancias; pero ¿por medio de qué mecanismo conserva el ojo de tal suerte su propiedad de percibir distintamente los objetos? En una palabra, ¿cómo se hace la *acomodacion?* Para las distancias cortas, por la contraccion de la pupila, y para las grandes, por un cambio en la forma del cristalino que disminuye su poder convergente; tales son los dos movimientos sometidos á nuestra voluntad, pero que tambien se efectúan sin que tengamos conciencia de ello, y con cuyo auxilio

explican los físicos la adaptacion de que hablamos.

Hay un límite inferior para la distancia de los objetos que procuramos ver distintamente; este límite es el de la *vision distinta* ó *punctum proximum*, que varía segun las edades entre 15 y 20 centímetros. El punto más remoto *(punctum remotum* ó más bien *remotissimum)* es infinito para ciertas vistas; mas con otras no sucede así, y se ha de apelar á los anteojos de larga vista para ver objetos algo distantes.

Cuando los músculos del ojo se hallan en estado de reposo, ó si se quiere, cuando no hacen ningun esfuerzo de acomodacion, la vision distinta es la que corresponde al *punctum remotum;* los ojos para los cuales este punto no tiene límites son los *normales* ó *emetropos* (1).

Los ojos para los cuales el *punctum remotum* no se halla á distancia infinita, no pueden acomodarse á contemplar objetos cuya distancia es mayor que la de dicho punto, y se les da el nombre de *braquimetropos* ó *míopes.* No pueden reunir en la retina sino los rayos luminosos que son divergentes en su punto de incidencia.

Dáse además el nombre de *hipermetropos* á los ojos cuya distancia focal es mayor que la del cristalino á la retina, de suerte, que, sin hacer un esfuerzo fatigoso de acomodacion, no pueden ver distintamente ni áun los objetos más apartados, ni los perciben con claridad á cualquier distancia que sea.

Por último, la conformacion del ojo puede ser tal que el límite de la vision directa supere al de que hemos hablado ántes. Esta afeccion, que se nota más especialmente en las personas de edad, las obliga á separar á bastante distancia el libro que quieren leer para poder hacerlo sin confundir las letras; lo cual depende de que la imágen va á formarse más allá de la retina (fig. 181), de suerte que la convergencia de los rayos emanados de un punto luminoso no tiene lugar en esta membrana, y por lo tanto la impresion es confusa. Alejando el objeto, se aproxima el foco y la vision se hace distinta. Las personas afectadas de este defecto en la vista son las *présbites,* atribuyéndose la presbicia á una disminucion del cristalino ó á una rigidez que no le permite adaptarse á las distancias cortas, y tambien á un aplanamiento del globo del ojo de delante á atrás.

Los *míopes* tienen el defecto contrario: la distancia de la vision distinta es mucho más corta para estos que para los individuos dotados de vista normal; y á grandes distancias la vision es siempre confusa, lo cual consiste en que, por razones opuestas á las que producen la presbicia, el foco ó la imágen de un punto luminoso se forma delante de la retina (fig. 182). Las causas más frecuentes de la miopía son una exagerada convexidad del cristalino ó una prolongacion del globo del ojo: las personas que por su profesion ú ocupaciones tienen que mirar de cerca objetos pequeños suelen padecer esta enfermedad de la vista.

El ojo no es acromático, como se creyó en un principio: pero la dispersion que se produce en sus distintos medios es casi insensible.

Muchos físicos han tratado de averiguar por qué pintándose las imágenes invertidas en la retina, las vemos en sus posiciones reales, esto es, derechas. Para explicar esta singularidad aparente se han emitido varias hipótesis más ó ménos ingeniosas, pero que, á nuestro juicio, carecen de sentido, puesto que la cuestion en sí no significa nada. En primer lugar, la imágen que se pinta en la retina no es para nosotros un objeto que examinamos como si aún tuviéramos otro ojo detrás de dicha membrana; pues á decir verdad, los objetos exteriores y nosotros mismos, nuestro propio cuerpo, los vemos en sus posiciones relativas exactas: esto es cuanto necesitamos, y cuando decimos que vemos un objeto, un árbol por ejemplo, derecho y no al revés, esto tan sólo significa que su cabeza nos parece como elevada al aire y los piés tocando al suelo, absolutamente en el mismo sentido que nuestra propia cabeza y nuestros piés en nuestra posicion normal.

Si, por una disposicion particular de nuestro ojo, análoga á la de ciertas lentes, las imágenes se formaran derechas en la retina, es casi indudable que nuestra percepcion en nada cambiaria; para que otra cosa ocurriera seria necesario exceptuar la imágen de nuestro cuerpo, lo cual no es admisible.

---

(1) De *emmetros*, en la medida y *of*, ojo. Aquí se trata solamente de la *vision distinta ;* pues puede haber ojos *emetropos* que tengan defectos por otros conceptos.

## II

### PERSISTENCIA DE LA IMPRESION LUMINOSA

La impresion que produce la luz en la retina, la sensacion que de ella resulta no cesan tan luégo como deja de obrar la causa que las da orígen. En una palabra, la accion de la luz puede ser sumamente breve, pero la sensacion persiste algun tiempo, cuya duracion depende de la intensidad de la luz á la vez que del estado de cansancio del ojo.

Fáciles son de observar los hechos que prueban esta persistencia: citemos algunos.

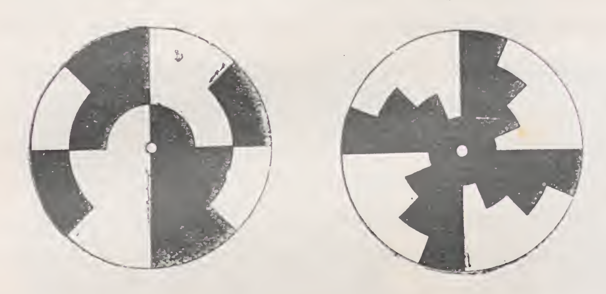


*Fig. 183.*—Discos rotatorios; experimentos sobre la persistencia de las impresiones luminosas

Cuando se dirige la vista á un objeto muy brillante, muy luminoso, al Sol, por ejemplo, y en seguida se cierran los ojos bruscamente, ó lo que es lo mismo, si se aparta la vista para mirar un fondo oscuro, se sigue viendo algun tiempo la imágen brillante del disco. Esta imágen *positiva* se amortigua rápidamente y desaparece para ceder el puesto á otras imágenes *accidentales* de las que diremos despues algunas palabras. Pero no es menester que el objeto contemplado tenga una luz tan intensa como la del Sol. Por ejemplo, si desde el interior de una habitacion se mira la luz difusa del dia que penetra por una ventana, y luégo se cierran de pronto los ojos, se ve cómo persiste distintamente la imágen de los rectángulos luminosos formados por los vidrios y limitados por las líneas oscuras de la vidriera.

Tambien es fácil comprobar de otro modo esta persistencia de la impresion luminosa. Basta mover con rapidez un punto brillante, como la punta de una vara quemada, para que se vea, en lugar de una serie de puntos luminosos aislados, una línea de fuego continua. Esta línea se convierte en un círculo, en una curva cualquiera, si se imprime un movimiento circular al extremo de la vara, ó si se la hace describir la curva en cuestion. Los rastros luminosos de los cohetes en los fuegos artificiales, los de las estrellas fugaces, reconocen en gran parte por causa la duracion de la impresion luminosa en la retina; decimos *en gran parte*, para que no se confunda la línea de fuego con el rastro, á veces persistente y probablemente material, que se observa despues de la desaparicion de ciertos bólidos.

Nótase el mismo fenómeno, si estando inmóvil el punto luminoso, se comunica el movimiento á un espejo que refleje su imágen. Hemos visto á Lissajous combinar las reflexiones en dos espejos formando ángulo recto para estudiar las vibraciones de dos diapasones y para comparar los tonos de los sonidos que estos producen. Las curvas ópticas obtenidas de este modo son indudablemente efecto de la persistencia de las impresiones luminosas sucesivas. Wheatstone habia sacado ya partido de esta persistencia con el *Kaleidófono* para estudiar los movimientos vibratorios de una varilla en cuya extremidad habia fijado una bolita de cristal: el punto luminoso formado por la reflexion de la luz del dia ó por la de un quinqué en este espejo esférico se convertia en curvas continuas cuyas sinuosidades marcaban los cambios de posicion ó las oscilaciones de la varilla. Tambien es la persistencia en cuestion la que nos hace ver una cuerda en vibracion hinchada por su parte media, y la que nos impide ver los rayos de una rueda en movimiento, cuando la rotacion es bastante rápida para que la sensacion sea continua.

Se pueden definir los hechos que acabamos de describir sucintamente, diciendo con Helmholtz que «las impresiones luminosas repetidas con suficiente rapidez producen en la vista el mismo efecto que una iluminacion no interrumpida.» Esto es cierto relativamente á la luz considerada, no tan sólo por lo que atañe á la intensidad, sino tambien al color. El experimento del disco giratorio como lo hizo Newton y que dejamos descrito en el capítulo VII, demuestra claramente cómo se sobreponen, ó mejor dicho, cómo se mezclan las sensaciones sucesivas de distintos colores cuando su sucesion es bastante rápida, y producen la sensacion de un solo color que es la síntesis de los colores componentes.

Se ha procurado valuar la duracion de la persistencia luminosa. D'Arcy, en el siglo pasado, Aimé en el actual, y despues Plateau han hecho con tal objeto algunas series de experimentos por diferentes métodos. El primero dedujo que dicha duracion era de $0^s,13$. El método de Aimé consistia en hacer girar en sentido contrario dos discos armados en un mismo eje, uno de los cuales tenia en su contorno una porcion de agujeritos equidistantes é iguales, al paso que el otro disco no tenia más que uno. Miéntras la rotacion es lenta no se ve á la vez más que una abertura luminosa, cuando el único agujero del segundo disco pasa por delante de los otros; pero si el movimiento es bastante rápido se ven dos, tres, cuatro aberturas luminosas á la vez, lo cual sucede tan luégo como la duracion de la impresion excede del tiempo que trascurre entre dos, tres ó cuatro coincidencias de los agujeros. Así se ha podido medir esta duracion comprobando la velocidad de rotacion, y estudiar además varias circunstancias del fenómeno.

Así tambien es como Plateau ha probado que la luz necesita cierto tiempo para que la sensacion sea completa y llegue á su máximum, y que este máximum dura, ántes de disminuir, tanto más cuanto más débil es la impresion.

Aparte de esto, la duracion total de la impresion crece con la intensidad de la luz, siendo por término medio de $0^s,84$.

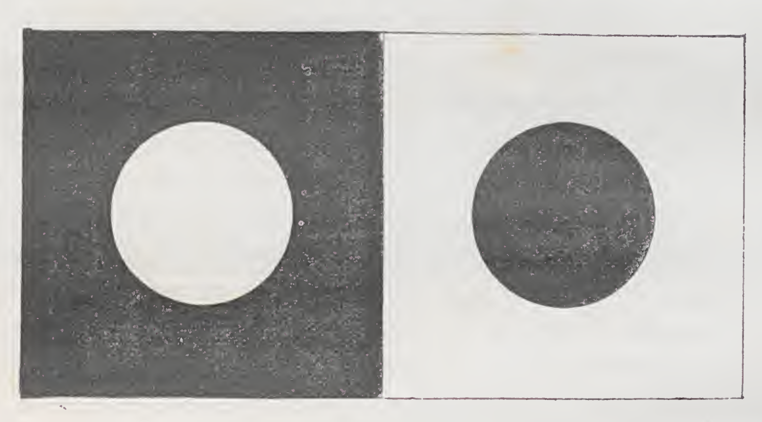


*Fig. 184.*—Fenómenos de irradiacion

Dando vueltas á un disco de carton dividido en 24 sectores alternativamente blancos y negros, ó blancos y de colores, ha reconocido Plateau que la velocidad de rotacion necesaria para que en el disco resultara una tinta gris ó un color uniforme depende de la intensidad de la luz, y tambien de la especie de color de que están teñidos los sectores. Subsiste la misma tinta, si la proporcion entre la superficie de los sectores blancos y la de los sectores negros permanece constante. Así se demuestra mediante el disco giratorio representado en la figura 183, en el que la superficie del círculo está dividida en tres zonas diferentes: la central, formada por un semicírculo blanco y otro negro, da el mismo color gris que la zona siguiente, cuya superficie está dividida en cuatro segmentos, y que el anillo exterior dividido en ocho partes alternativamente blancas y negras. Sólo que la velocidad de rotacion necesaria para que cada zona sea uniforme, va creciendo del contorno del disco al centro. Bastan seis revoluciones por segundo para obtener la uniformidad del anillo externo, doce para el anillo medio y veinticuatro para el círculo central. Cuando esta velocidad es suficiente para el último, el disco parece teñido uniformemente. Por el contrario, si el número de sectores continúa siendo el mismo, se puede cambiar la relacion de anchura de los sectores blancos y de los negros sin que cambie la velocidad necesaria para la uniformidad, de lo cual es fácil cerciorarse merced á un disco dispuesto como el segundo círculo de la fig. 183, cuyos sectores blancos van ensanchándose desde el centro á la circunferencia.

Cuando un cuerpo se mueve con cierta rapidez, la vista no puede distinguir con claridad su forma ni sus detalles. Para ello seria menester que el eje óptico pudiera cambiar de posicion tan de prisa como el objeto, á fin de que la imágen de éste se formara siempre en los mismos puntos de la retina; mas como esto suele ser imposible, la imágen misma es la que cam-

bia de lugar en el fondo de dicha membrana, y subsistiendo la persistencia de la impresion en cada uno de los puntos en que aquella se forma, resulta superposicion y por lo tanto confusion de las diversas partes del objeto. El ejemplo más sencillo de esta confusion es el de los rayos de una rueda en movimiento.

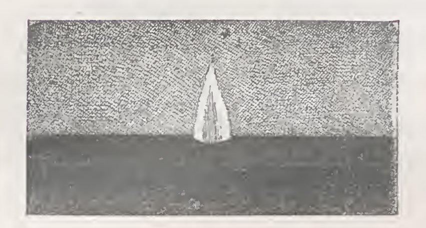


*Fig. 185.*—Irradiacion. Mella aparente de la arista de una regla

Pero cuando la luz que ilumina y permite ver al objeto en movimiento dura sólo un brevísimo espacio de tiempo, cuando le alumbra por decirlo así instantáneamente de modo que el cambio de posicion del cuerpo sea imperceptible, entónces no se forma más que una imágen, y la persistencia de la impresion hace ver distintamente el cuerpo, el cual parece inmóvil, como si se hubiera detenido bruscamente en el preciso momento en que le ha dado el rayo luminoso. Este caso se observa en las tempestades nocturnas: la duracion del relámpago es entónces tan corta y su luz al propio tiempo tan viva, que se ve el paisaje con gran claridad, y un objeto en movimiento, pòr ejemplo, un tren de ferro-carril parece parado, por más que marche á todo vapor.

Un fenómeno singular, pero de fácil explicacion, es el que se observa cuando se hace girar sobre el mismo eje, con velocidades iguales aunque en sentido contrario, á dos ruedas del mismo número de rayos: entónces se ve una rueda inmóvil pero con los rayos duplicados. Esta apariencia tiene por causa la coincidencia de estos y la superposicion de las impresiones ocasionadas por cada uno de ellos. Si suponemos una de las ruedas en reposo, estas coincidencias serán á cada vuelta iguales en número á los rayos, pero dos veces más numerosas si las dos ruedas giran simultáneamente en opuesto sentido. En el caso de que su respectiva velocidad fuese diferente, se veria cómo cambiaban los puntos de coincidencia, y la rueda pareceria girar con lentitud.

Réstanos añadir algunas palabras sobre las *imágenes accidentales:* ya hemos hecho mencion de las que se forman cuando cerramos bruscamente los ojos despues de mirar con fijeza un punto luminoso ó desviamos la vista para dirigirla á un punto oscuro; la imágen es entónces luminosa como el objeto, por cuya razon se la llama *positiva.* Pero si se contempla con atencion por espacio de bastante tiempo, como unos treinta ó cuarenta segundos segun la intensidad de la luz, un objeto luminoso, una ventana por la cual penetre la luz del dia, y en seguida se vuelve la vista á una pared blanca ó al techo, entónces la imágen accidental que se forma es *negativa;* la vidriera aparece como una cruz blanca que se destaca sobre cristales oscuros.

Estas imágenes accidentales persisten á veces bastante tiempo, y se siguen viendo aunque se cierren los ojos. Segun ciertos fisiólogos, las ocasiona el estado de cansancio que han soportado los puntos de la retina en que la luz ha obrado con más fuerza, y por el contrario, aquellos en que se forma la imágen de las partes oscuras han sufrido ménos excitacion. Cuando se dirige la vista en seguida á otra superficie, la sensibilidad es menor en los primeros puntos que en los otros, la luz es en ellos ménos viva, resultando una imágen negativa del objeto primitivamente contemplado.

Esta explicacion es insuficiente: la que ha dado Plateau parece más satisfactoria y completa; en concepto de este físico, la retina impresionada no vuelve instantáneamente al estado de reposo, sino que oscila entre dos estados opuestos, entre dos impresiones contrarias que hacen que el negro suceda al blanco y á un color cualquiera ó complementario; pero en rigor todavía no sabemos en qué consisten estos estados opuestos de la retina,

Las imágenes accidentales, así las positivas como las negativas, cambian de posicion con el eje óptico, de suerte que su situacion aparente en el campo visual coincide siempre con el punto de la retina que ha recibido la impresion primera, con la mancha amarilla, si la vision ha sido directa y distinta.

En la segunda parte de la Luz, describiremos algunas interesantes aplicaciones del fenómeno de la persistencia de las impresiones luminosas.

Cuando se mira á alguna distancia un cuerpo muy luminoso que se destaca sobre fondo oscuro ó negro, parece que la imágen invade en parte este fondo, de lo cual es fácil cerciorarse por un experimento muy sencillo. Se dibujan dos figuras iguales, por ejemplo, dos cuadrados, ó dos círculos (fig. 184), uno negro sobre fondo blanco, y otro blanco sobre fondo negro, y se los coloca muy próximos haciendo que les dé una luz viva. El círculo blanco parecerá más grande que el negro. Dáse á este fenómeno el nombre de *irradiacion*.

Preséntase bajo variadas apariencias. Si ponemos delante de la llama de una vela (fig. 185) una regla negra que corte la imágen de la llama, veremos cómo desborda ésta de la arista de la regla, formando en ella una muesca ó mella luminosa. Cuando la Luna se halla entre la conjuncion y el cuarto creciente, y su parte luminosa tiene la forma de una hoz, y el resto del

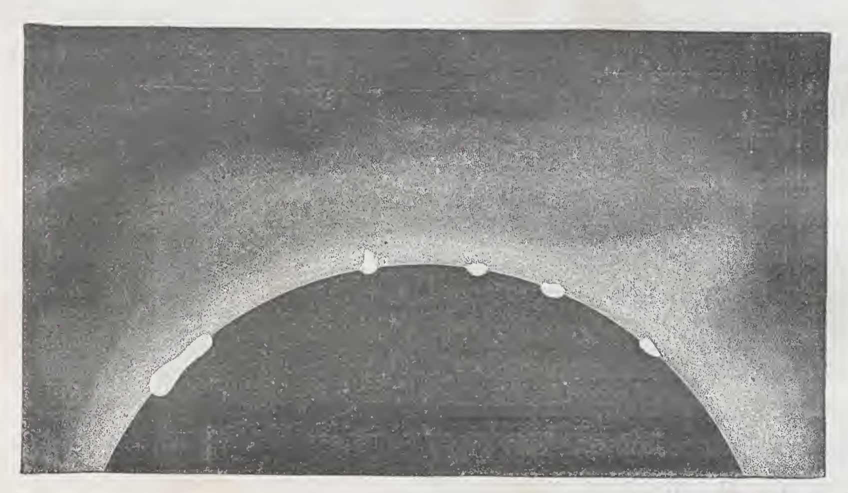


*Fig. 186.*—Las proruberancias solares durante un eclipse total de sol (eclipse del 22 diciembre 1870)

disco es visible merced á la luz cenicienta, parece que los dos segmentos lunares no pertenecen al mismo círculo, pues el contorno de la parte iluminada rebasa el de la opaca. Durante los eclipses totales de Sol, en el momento en que el disco lunar vela enteramente la luz deslumbradora del astro, se perciben masas luminosas rojizas designadas por los astrónomos con el nombre de *protuberancias;* descansan por su base en el contorno oscuro de la Luna, pero tambien lo rebasan, como se ve en la figura 186. El efecto es enteramente semejante al de la irradiacion.

Este fenómeno es tambien el que hace que nos parezcan cortadas las líneas de separacion de un tablero de damas ó de un conjunto de cuadrados ó de rectángulos alternativamente blancos ó negros (fig. 187), y el que da tambien á una reunion de círculos tangentes el aspecto de una serie de figuras exagonales (fig. 192).

Pero ¿cuál es la causa de la irradiacion? Unos, y entre ellos Plateau, la atribuyen á una continuacion de la impresion de la retina más allá del contorno de una imágen intensa. Otros, como Trouessart, suponen que se forman imágenes múltiples que se sobreponen en parte unas á otras. Ambas teorías consideran la irradiacion como un fenómeno subjetivo inherente á la sensibilidad de la retina, ó á ciertos accidentes que se encuentran en los medios del ojo. Ocurre sin embargo una dificultad, y es que algunos de los fenómenos en cuestion (como la irradiacion de las protuberancias en los eclipses) se han obtenido objetivamente y se ven en la fotografía. Seria pues forzoso admitir que los objetivos y las placas sensibilizadas usados por los

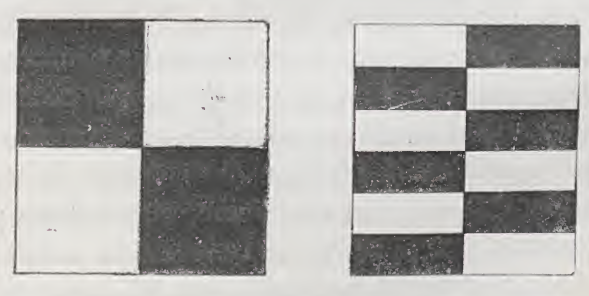


*Fig. 187* —Efectos de irradiacion

fotógrafos tienen una propiedad ó disposicion precisamente análoga á las que se supone que existen en nuestros órganos (1).

(1) Segun M. Le Roux, el fenómeno de la irradiacion es «especial del campo de la vision indistinta; aumenta á medida de la distancia que hay á la *fovea centralis;* para esta porcion de la retina no existen los fenómenos de irradiacion, tal cual los describen los autores; para ella no hay otra irradiacion que la que procede de lo penetrante de la

## III

### ILUSIONES DE ÓPTICA

Hay ocasiones en que los ojos, áun los más sanos y normales, ven los objetos muy diferentes de como son en sí; dándose el nombre de *ilusiones de óptica* á las falsas apariencias que entónces presentan las imágenes.

Segun esta definicion, podríamos considerar como ilusiones de óptica muchos de los fenómenos descritos en el párrafo precedente, debiendo hallarse en tal caso los efectos de la persistencia luminosa, las imágenes accidentales, la irradiacion, etc. Lo difícil es saber distinguir perfectamente lo que depende de la sensacion misma y lo que sólo es cuestion de apreciacion. Puede suceder, como en efecto sucede, que ciertas sensaciones visuales no correspondan á objetos reales; por ejemplo, una sacudida, un golpe en el globo del ojo producen una sensacion de luz, aunque no haya delante ningun objeto luminoso. En otros casos, hay una impresion exterior que determina perfectamente la sensacion, y la imágen pintada en la retina es la que debe ser en un ojo normalmente conformado; sin embargo formamos un concepto erróneo, una apreciacion falsa, cuya causa debemos indagar en cada caso, lo cual no siempre es fácil.

Ante todo, ¿qué debe entenderse por estas palabras; *ver las cosas como son en sí?*

El sentido de la vista, como los demás sentidos, exige una educacion prévia, que casi todos le procuramos instintivamente, en una época de la vida en que somos incapaces de darnos cuenta de las adquisiciones sucesivas, fruto de una observacion y de una experimentacion inconscientes por decirlo así. Sin embargo, poco á poco y con el auxilio continuo de los otros sentidos, aprendemos á juzgar de la forma de los objetos, de sus colores, posicion, dimensiones y distancias, y á apreciar el relieve ó la solidez de cada uno de ellos. Cuando esta educacion ha llegado á ser todo lo completa y perfecta posible, y si por otra parte no tenemos ningun defecto de conformacion en el órgano visual, en la sensibilidad de la retina, cosa más rara de lo que se cree, entónces decimos que vemos los objetos tales como son en realidad. Sin embargo, áun en esta hipótesis pueden presentarse los objetos de tal modo que nuestro juicio no se conforme con esta realidad, y que la sensacion nos parezca distinta de lo que debiera ser, como se puede comprobar fácilmente.

Por ejemplo, al ver algunas líneas rectas trazadas geométricamente, solemos reconocer al punto sus direcciones verdaderas, sus posiciones relativas exactas. Pues bien, examinando la figura 188 formada por un ancho trazo negro

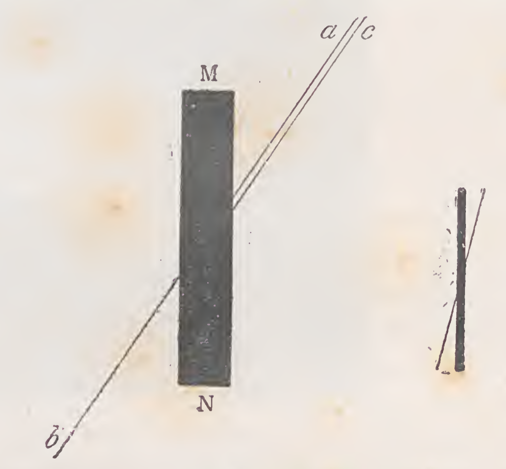


*Fig. 188.*—Ilusion de óptica

y dos líneas paralelas más finas *a* y *b*, que lo cortan en ángulo agudo, la vista cree que la línea *b* se prolonga en la direccion de la línea *c*, lo cual no es así, como se puede comprobar fácilmente. Este error de apreciacion respecto de la direccion de las líneas no es menor aunque se dé menos espesor al trazo negro atravesado por la línea delgada.

Otra clase de ilusion es la de la fig. 189: si se trazan sobre dos líneas paralelas otras líneas oblicuas dirigidas á cada lado en sentido contrario, bastará esta disposicion para que no conozcamos el paralelismo de las primeras: sino que parece que convergen en una direccion opuesta á aquella en que irian á reunirse las oblicuas que las encuentran. En la figura 191, la ilusion es tanto más marcada cuanto que se reunen en ella los efectos anteriores. Las bandas negras verticales parecen alternativamente convergentes y divergentes: además, los trazos que las cortan, aun cuando atraviesan las bandas en línea recta, no se hallan en apariencia en sus respectivas prolongaciones, y el efecto es el de la ilusion de óptica representada en la figura 188.

---

vista; para el campo de la vision indistinta, la irradiacion es tambien asunto de perspicacia de la vista, explicándose fisiológicamente por la separacion progresiva de los elementos sensibles de la retina cuando se aleja de la *fovea centralis*, punto de su máximum de concentracion.

No es fácil de averiguar la razon de estas apariencias. Se ha apelado á la irradiacion, y luégo á los movimientos involuntarios del ojo; segun Helmholtz, fijando la vista en un punto determinado del dibujo, las ilusiones desaparecen, lo cual será exacto sin duda para el eminente físico, pero no para otras vistas.

Donde la irradiacion desempeña seguramente un papel, es en el modo cómo se ve una serie de círculos tangentes, ya se destaquen estos círculos en blanco sobre fondo negro ó ya suceda lo contrario. En ambos casos, se cree ver exágonos y no círculos, y tan pronto son los círculos blancos los que parece destruir los espacios negros, como los negros parece estrechar los espacios blancos, y como el efecto se produce al rededor de los seis puntos de tangencia, resulta para los círculos una forma aparentemente exagonal. M. A. Nachet se refiere á esta ilusion en el periódico *La Naturaleza*, diciendo que ha inducido á error á los naturalistas que observaban con el microscopio las estrías de ciertas diatomeas, creyendo ver exágonos donde en realidad no habia más que círculos ó más bien hemisferios.

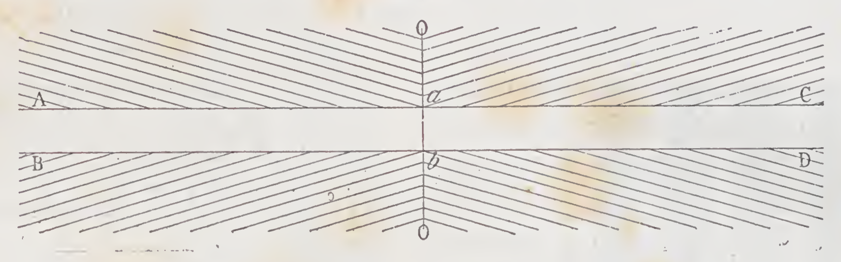


*Fig. 189.*—Ilusion de óptica: aparente divergencia de líneas paralelas

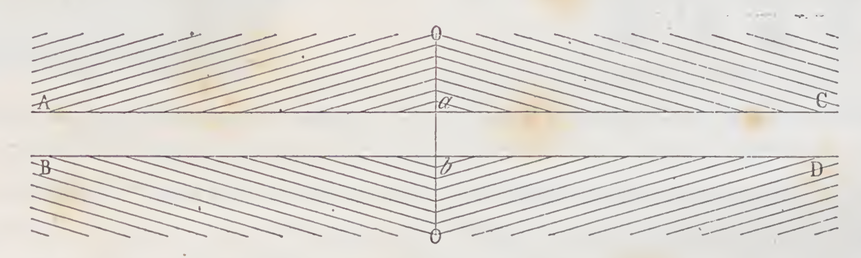


*Fig. 190.*—Aparente divergencia de líneas paralelas

De las ilusiones ópticas que se refieren á la direccion de las líneas, á la forma de las figuras, se puede pasar á las que conciernen á las dimensiones de los objetos. Una línea dividida parece por lo regular más larga que una línea igual en la que la vista no tenga ningun punto de referencia. En esto consiste que, si se mira un cuadrado formado de líneas equidistantes, toma el aspecto de un rectángulo cuya mayor dimension es la que tiene divisiones. Un objeto dividido por líneas horizontales parece perder parte de su altura; en cambio, parece más elevado si está dividido por líneas verticales. Un haz de columnitas delgadas parecerá más alto que una sola columna que tuviese la misma altura y tambien la misma anchura que el haz. Esta es una de las causas por las cuales parecen las naves de las iglesias góticas de mayor elevacion: una bóveda de la misma altura, en un edificio de arquitectura romana ó griega, pareceria mucho más baja (1).

La lenta y progresiva educacion del sentido de la vista nos permite juzgar con una exactitud que, á decir verdad varía segun los individuos, de las distancias reales y relativas de los objetos y de sus dimensiones verdaderas, que por lo comun referimos á las distancias presumidas. Más adelante veremos que esta apreciacion de las distancias se enlaza con otra impresion llamada *impresion del relieve*, la cual depende de la vision simultánea de los dos ojos. Al describir los instrumentos conocidos con el nombre de *estereóscopos*, trataremos de este asunto. Pero no terminaremos este artículo sin recordar una ilusion que todos hemos padecido; la que hace que los objetos celestes nos parezcan más grandes en el horizonte que en el zenit

(1) Refiriéndonos á otra clase de consideraciones estéticas, añadiremos que los vestidos rayados horizontalmente sientan mejor á las personas altas y delgadas; las telas rayadas verticalmente son más á propósito para las bajas y gruesas.

ó que á cualquier otra altitud. El disco del Sol á su orto y á su ocaso, el de la Luna en iguales circunstancias nos parecen mucho mayores en el horizonte que en el meridiano (1). Lo propio sucede con las constelaciones: cuando sale el cuadrilátero de Orion parece inmenso comparado con el aspecto que presenta en su culminacion.

La ilusion es evidente; pero no lo son tanto las explicaciones que de ella se han dado, y que se reducen á dos: unos atribuyen el fenómeno á la forma aparente de la bóveda celeste, forma que no es hemisférica, sino más bien elipsoidal ó rebajada, y por consiguiente ménos elevada sobre nuestras cabezas que en el horizonte. Segun Eulero, esta forma nos hace creer que los objetos situados en el horizonte están más distantes de nosotros que en el zenit; pero, á igualdad de dimensiones aparentes, los objetos que suponemos más inmediatos son los que nos parecen más pequeños. De aquí resulta la ilusion que nos hace juzgar á la Luna tanto ménos grande cuanto á mayor altura se halla en el cielo. Otros opinan que la causa de esta ilusion consiste en que la Luna en el horizonte se halla aparentemente próxima á los objetos con que podemos compararla y cuyas dimensiones conocemos, como árboles, casas, etc. Esta comparacion es imposible cuando dicho astro se halla en el zenit, y como allí está aislado queda reducido á sus verdaderas dimensiones aparentes, que son tan sólo una pequeña fraccion del contorno del cielo.



*Fig. 191.*—Convergencia y divergencia alternativas de líneas paralelas

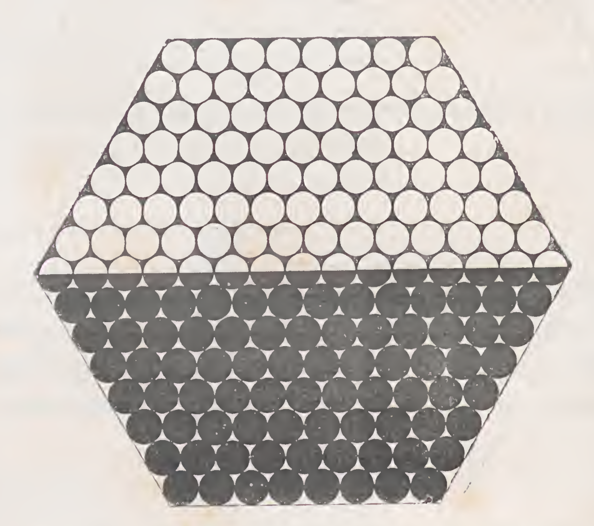


*Fig. 192.*—Forma exagonal aparente de círculos tangentes: efecto de irradiacion.

Es posible que la ilusion se deba simultáneamente á ambas causas; pero quizás haya que añadir otra, cual es la débil intensidad de la luz de los discos lunar ó solar amortiguada por la interposicion de las capas de vapor, mucho mas densas en el horizonte que en el zenit.

Acabamos de hablar de las ilusiones ópticas, entendiendo por tales las falsas apariencias que adquieren los objetos en ciertas circunstancias para una vista sana y normal. Podríamos multiplicar en gran manera los ejemplos que hemos citado; pero hay otras ilusiones que tienen por causa algun defecto en el órgano visual ó ciertas alteraciones morbosas, y cuyo estudio es por lo tanto de la incumbencia del fisiólogo mucho más que de la del físico. Citaremos, no obstante, uno ó dos casos, porque son mucho más frecuentes de lo que se creeria.

Empecemos por hacer mencion de un defecto que existe hasta en una vista normal, áun cuando en esta no sea tan marcado. Este defecto es el que se llama *astigmatismo*. Mirando fijamente con un solo ojo los círculos concéntricos de la figura 193, se observarán notables diferencias en la nitidez de la vision en sectores opuestos de los círculos. Las líneas blancas y negras se distinguirán claramente siguiendo ciertos diámetros; pero si se siguen otros habrá

(1) Por lo que respecta á la Luna, el efecto es tanto más sorprendente, cuanto que las dimensiones aparentes ó angulares del disco son por el contrario algo más pequeñas cuando el astro está en el horizonte que cuando está en el zenit. En el horizonte, la Luna se halla más distante del observador en una longitud casi igual á la de un radio de la Tierra. Por consiguiente su diámetro deberia parecernos más pequeño, pero sucede todo lo contrario.

confusion, y la superficie de los sectores parecerá nebulosa y cenicienta. La posicion de estos sectores de apariencias diversas dependerá de la acomodacion de nuestra vista.



*Fig. 193*.—Experimento de astigmatismo

La explicacion del astigmatismo está en la conformacion ó en la curvatura de las superficies refringentes del ojo, que no es simétrica en todos sentidos, de suerte que los rayos no tienen en él el mismo foco en un plano horizontal que en uno vertical. Cuando el ojo está adaptado para la vision distinta de los arcos horizontales, no lo está para los verticales y recíprocamente.

Otro defecto de la vista consiste en no distinguir ciertos colores, ó en distinguir un número menor de los que percibe una vista normal. Dase el nombre de *acromatopsia* á esta afeccion conocida tambien con el de *daltonismo*, porque el célebre físico Dalton fué el primero en estudiarla y en sí mismo.

«Los individuos que tienen esta afeccion completamente desarrollada, dice Helmholtz, no ven en el espectro más que dos colores, que suelen designar con los nombres de *azul* y *amarillo*, en cuyo último color comprenden el rojo, el anaranjado, el amarillo y el verde: llaman *gris* á los tonos azul-verdosos, y *azul* á todo lo demás. Cuando el rojo extremo es débil, dejan de verlo en absoluto, pues sólo lo perciben cuando es intenso. Por esta razon indican comunmente como límite del espectro una parte en que los ojos normales ven distintamente un rojo débil. Entre los colores de los cuerpos, confunden el *rojo* (es decir, el cinabrio y el anaranjado rojizo) con el pardo y el verde en los casos en que los ojos normales ven por lo general el rojo con mucha mayor intensidad que el pardo y el verde. No distinguen el *amarillo de oro* del *amarillo*, ni el *rosa* del *azul*.» (*Optica fisiológica.)*

Este defecto es bastante comun para que las compañías de ferro-carriles hayan juzgado necesario, de algunos años á esta parte, disponer que se reconozca especialmente á varios de sus empleados, como maquinistas, guarda-agujas, etcétera, que deben hacer señales ú observarlas. Las luces blancas, encarnadas y verdes ó los discos del mismo color corresponden á indicaciones opuestas, y la confusion de estos colores podria tener consecuencias sumamente peligrosas.

Wallaston se ocupa en los siguientes términos de otro defecto singular de la vista:

«A consecuencia de un violento ejercicio, dice, reconocí de pronto que no podia ver más que la mitad de la figura de una persona que hallé en mi camino, y otro tanto me sucedia cualquiera que fuese el objeto que mirara. Habiendo querido leer el nombre JOHNSON escrito sobre una puerta, veia solamente la sílaba SON: el principio de la palabra desaparecia enteramente de mi vista. En este ejemplo particular, la pérdida de la vision tenia lugar á la izquierda, lo mismo si miraba con un ojo que con el otro. Esta ceguera no era completa, sino que los objetos parecian cubiertos de una sombra intensa y sin contornos bien marcados. La afeccion duró poco tiempo; en un cuarto de hora se disipó enteramente. Recobré poco á poco la sensibilidad visual que partiendo del centro, avanzó subiendo oblicuamente hácia la izquierda.»

Wollaston sufrió más adelante otro ataque de esta afeccion, de esta *semi-ceguera* y observó en un amigo suyo un caso análogo, pero persistente. «El campo visual es bastante extenso para que mi amigo pueda leer perfectamente, dice; ve lo que escribe, la pluma que emplea, pero no la mano que la dirige.» Al ocuparse Arago de estos hechos, dice que la afeccion descrita por Wollaston es bastante comun: conocia cuatro personas sujetas á ella, y él mismo se habia visto atacado varias veces.

Esta insensibilidad de la mitad de la retina parece como una extension de la *mancha ciega.*

Dase el nombre de *hemiopsia* á la afeccion que acabamos de describir.

## IV

### LA VISION EN LOS ANIMALES

Los animales vertebrados tienen conformado el órgano de la vista poco más ó ménos como el del hombre, difiriendo solamente en las partes accesorias. La pupila de las especies nocturnas es más ancha, y la superficie de la retina más dilatada. Los animales que viven en la oscuridad tienen ojos enteramente rudimentarios, como por ejemplo, las ratas ciegas de Oriente, los topos y las anguilas. El cristalino de las aves es más aplanado que el de los mamíferos, de suerte que son naturalmente présbites. En los peces sucede lo contrario, pues su cristalino es esférico, por requerir el medio más denso en que viven una lente más refringente que la de los animales áereos: los peces son míopes.

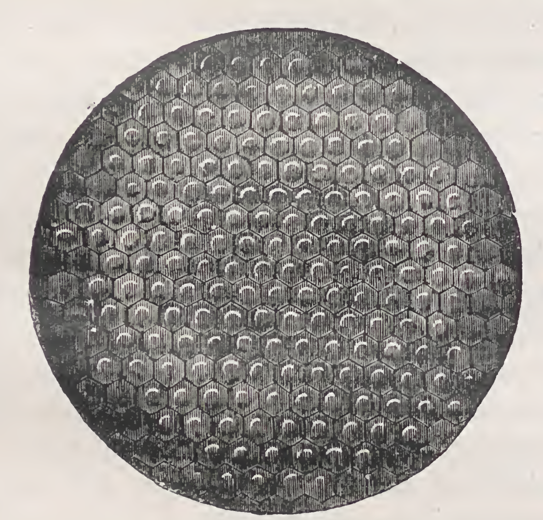


*Fig. 194.*—Ojo compuesto de los insectos; córnea de mosca

Los ojos de los invertebrados están conformados de muy distinto modo; por lo general se componen de una multitud de ojuelos aislados, cada uno de los cuales tiene un nervio óptico ó más bien una fraccion del nervio óptico. Segun J. Muller, cada ojo elemental de los ojos de facetas que se observan en los insectos (figuras 194 y 195) no percibe más que un punto luminoso, siendo la reunion de estas impresiones múltiples la que constituye la imágen, del propio modo que resulta en nosotros de las impresiones producidas por la luz en los diversos puntos de la retina.

¿Ven los animales como nosotros? ¿Son las mismas radiaciones las que producen en ellos la sensacion luminosa? Cuestion es esta que se ha estudiado muy poco hasta el presente, segun creemos. P. Bert ha hecho algunas observaciones con respecto á este asunto, y hé aquí como plantea el problema y como lo ha resuelto desde el punto de vista particular en que se ha colocado:

«¿Ven todos los animales, dice, los rayos que llamamos luminosos en el espectro? ¿Ven algunos que nosotros no veamos? Si hay identidad en la extension de la percepcion del espectro luminoso para ellos y para nosotros, ¿la hay tambien en la energía relativa de las sensaciones visuales en las diferentes regiones del espectro?»

Para hacer estos experimentos escoge animales todo lo posible desemejantes del hombre, tanto por su constitucion general como por la estructura de sus ojos. Los elegidos fueron las *Dafnias pulgas*, crustáceos microscópicos muy sensibles á la luz y que se precipitan de noche en derredor de la que se les presenta. Colocados estos animales en una vasija en la que no podia penetrar la luz sino por una angosta rendija, nadaban indiferentemente en todos los puntos del líquido miéntras estaban á oscuras, pero se agolparon presurosos en direccion de la hendidura tan luego como se hizo penetrar por ella un haz de luz eléctrica dispersada por el prisma. «Se les hace acudir de este modo, ya se les envien rayos rojos, ó morados, ó la serie intermedia.» En cambio, se mostraron indiferentes á la region ultra-morada del espectro lo propio que á la de los rayos oscuros del rojo extremo. Pero las partes más brillantes del espectro, el amarillo, el rojo, el verde, los atraian de un modo manifiesto más que el azul y el morado.

«Así pues, dice M. Bert, primer punto averiguado: las Dafnias pulgas perciben en el estado luminoso todos los rayos que nosotros vemos; segundo punto: no perciben en el estado luminoso ninguno de los rayos que nos pasan desapercibidos; por último, la energía relativa de las sensaciones visuales en las varias regiones del espectro es la misma en dichos animales y en nosotros.»

Ahora, ¿es preciso generalizar, como nuestro sabio compatriota, las conclusiones precedentes y admitir que todos los animales de la serie entera ven los mismos rayos con igual intensidad relativa? Unicamente haciendo nuevas observaciones en mayor número de tipos zoológicos se podria confirmar ó invalidar esta manera de considerar el asunto. Sir John Lubbock ha hecho los siguientes experimentos en hormigas. Habiendo puesto varios de estos insectos con sus larvas en un cristal cuadrado de las dimensiones estrictamente necesarias para que pudieran moverse en él libremente, cubrió una parte del cristal con una sustancia opaca, y al punto vió que las hormigas trasladaban sus larvas á la region oscura. Poniendo entónces delante de este cristal otros dos, uno amarillo, y otro morado juntos, las hormigas trasladaron su prole detrás del cristal amarillo. De esto deduce M. Lubbock que la luz morada es para las hormigas más trasparente que la amarilla. Otros experimentos le hicieron suponer que dichos insectos perciben los rayos ultra-morados. En resúmen, parece probable que los varios rayos del espectro ejercen en aquellos distinta accion que en el hombre.

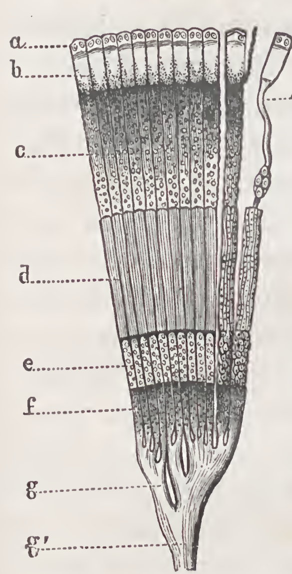


*Fig. 195.*—Estructura del ojo compuesto de los insectos

Finalmente, parece cierto que la luz tiene una influencia especial en ciertos animales privados del órgano de la vista. En este caso parece difícil de definir la naturaleza de la percepcion que estos animales experimentan; pero este hecho es sobrado curioso para que nos permitamos mencionarlo aquí. Conócese ya un crecido número de animales inferiores que, privados de todo órgano exterior de la vision, son sin embargo sensibles á la accion de la luz, por ejemplo, los pólipos de agua dulce, los balanos. M. Jorge Pouchet ha reconocido y estudiado hace poco esta misma sensibilidad en las larvas de moscas, y en virtud de una serie de experimentos muy decisivos ha probado que estos animales, no tan sólo perciben la luz, sino que saben conocer cuál es la direccion en que les llega; lo cierto es que huyen de ella, dirigiéndose paralelamente al camino seguido por los rayos. «Esta percepcion, dice, no se efectúa por mediacion de los órganos sensitivos aparentes en el primer anillo ó segmento, pues persistia aún despues de cortados dichos órganos. ¿Se efectúa acaso por los botones oculares que flotan en la cavidad visceral ó por algun órgano ignorado, ó bien es sensible á la luz toda la capa hipodérmica? En tal caso, ¿obra esta como obró en los hidras verdes al hacer Tremblay su famoso experimento, ó como en las ranas á las que se ha cegado y que saben *á la larga* situarse en el punto de su encierro donde más luz pueden recibir? Hay una notable diferencia entre estos últimos actos que sólo suponen una percepcion lenta y oscura de la luz, y los de la larva de mosca. En esta, la percepcion es rápida, instántanea, y además la direccion *inmediatamente* percibida; de suerte que es difícil no asimilar esta percepcion de la larva, cualquiera que sea, á las percepciones proporcionadas por los órganos sensitivos propiamente dichos y áun notablemente perfectos, puesto que perciben á la vez la direccion y la intensidad.»

Planteadas así todas las cuestiones relativas á las sensaciones luminosas que experimentan los séres vivientes y á la influencia que ejerce la luz en sus órganos y en sus vidas, son del dominio de la fisiología más bien que del de la física; mas para resolverlas hay que recurrir forzosamente á los métodos experimentales de los físicos, por lo cual se puede ver cuánta importancia puede tener para el progreso de las mismas ciencias naturales el estudio de la parte de la Física que acabamos de exponer sucintamente en esta obra.

# CAPITULO XVIII

## LA LUZ Y LA VIDA

### I

### INFLUENCIA DE LA LUZ EN LA VIDA VEGETAL

Al principio de esta obra hemos enunciado una verdad que al parecer no necesita demostracion, cuando hemos dicho que la luz es una de las condiciones de vida en la superficie del globo terráqueo, tan esencial para la existencia de los animales como para la de los vegetales. Pero si todos aceptamos esta afirmacion como evidente, no todos se dan siempre perfecta cuenta del modo de intervenir el agente luminoso en los fenómenos del mundo orgánico.

Vamos á recordar sucintamente cuanto la ciencia permite hoy consignar acerca de esta interesante cuestion, y veamos ante todo cuál es la influencia de la luz en la vegetacion.

Miéntras la planta está en su período de desarrollo llamado *germinacion*, la luz no ejerce en ella ninguna influencia útil ni nociva. La humedad, el oxígeno y cierto grado de calor son condiciones indispensables para que germinen las semillas: la luz no es tan necesaria entónces, mas parece que tampoco sea perjudicial, como lo hicieron creer los experimentos hechos el pasado siglo por Senebier é Ingenhousz. Véase lo que acerca de esto dice M. Deherain en su *Curso de química agrícola*:

«T. de Saussure ha observado que unas cuantas semillas puestas en vasijas opacas y otras en vasijas trasparentes, pero preservadas de la luz directa del Sol, germinaron al mismo tiempo, siendo probable que los rayos solares perjudiquen á la germinacion por la desecacion que ocasionan. Si una luz moderada no parece desfavorable, tampoco es útil: las semillas germinan perfectamente en la oscuridad, y los cerveceros preparan generalmente en los sótanos el malto, es decir la cebada fermentada que usan para fabricar la cerveza.»

Hace poco más de un siglo que se efectuaron los primeros experimentos sobre la influencia de la luz en el acto de la vegetacion. Priestley reconoció primeramente que las plantas vivas producen efectos contrarios á los de la respiracion animal, y que «propenden á conservar la atmósfera apacible y saludable, cuando á consecuencia de la vida y respiracion de los animales ó de su muerte y putrefaccion contiene elementos nocivos.» Ingenhousz reconoció poco despues que las plantas expuestas al Sol desprenden oxígeno, y Senebier completó el descubrimiento demostrando que este oxígeno procede de la descomposicion del ácido carbónico del aire, descomposicion efectuada bajo la influencia de la luz del Sol por el acto de la vegetacion.

Posteriormente, un gran número de sabios, fisiólogos y físicos, ha estudiado tan importante fenómeno bajo todos sus aspectos.

Las partes verdes de las plantas, las células de *clorofila* son las que poseen la propiedad de desprender ácido carbónico bajo la influencia de los rayos luminosos, de eliminar el oxígeno de este gas y de fijar el carbono que la planta se asimila entónces y del cual compone su parte combustible. Saussure ha probado que las partes verdes son incapaces de efectuar esta descomposicion, ó más bien que consumen oxígeno para devolverlo en forma de ácido carbónico.

Demuéstrase en las cátedras este experimento fundamental del modo siguiente: Métese una planta palúdica en un gran frasco lleno de agua que tenga en disolucion una corta cantidad de ácido carbónico, y el frasco, provisto de un tubo abductor, se pone al sol. Al poco rato se cubren las hojas de burbujillas de gas, que pasan á la parte inferior de la probeta, y se obtiene en último término un gas bastante rico en oxígeno para encender cerillas fosfóricas recien apagadas y cuya punta esté todavía

incandescente. El desprendimiento de gas aumenta ó disminuye segun que aumente ó disminuya la intensidad de la luz que reciben los vegetales; á la oscuridad cesa enteramente.

Las plantas viven de noche á la manera de los animales; absorben oxígeno y desprenden ácido carbónico; sólo que, como lo ha demostrado Corenwinder, «la cantidad de ácido carbónico descompuesta de dia y al sol por las hojas de las plantas, es mucho mayor que la que exhalan de noche. Por la mañana suele bastarles treinta minutos de insolacion para recobrar lo que pueden haber perdido durante la oscuridad.

Una curiosa observacion hecha por Deherain, demuestra la importancia de la presencia ó de la falta de luz para esta doble funcion de las plantas. En el mes de julio de 1868 se halló la superficie de una charca de la hacienda

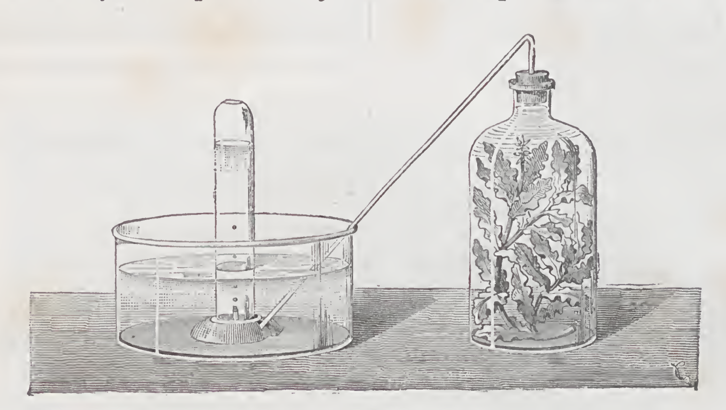


*Fig. 196.*—Aparato Cloez y Gratiolet. Descomposicion del ácido carbónico por las plantas acuáticas puestas al sol

de Grignon enteramente cubierta de hojas de una planta llamada *lenteja de agua*, en términos de que el nivel del líquido formaba una red de bastante resistencia para que los pájaros pudieran andar sobre ella. En breve aparecieron á la superficie de la charca muchos peces muertos: Deherain atribuyó al pronto su muerte á un envenenamiento por el hidrógeno sulfurado; mas al ver los pajarillos que andaban por la charca sin sentir molestia alguna, conoció que no era tal la causa de la muerte de los peces. De varios experimentos dedujo que aquellos animales habian debido morir asfixiados; que la lenteja de agua habia formado en la superficie del agua una cubierta bastante espesa para interceptar los rayos luminosos y que las plantas sumergidas, sumidas de esta suerte en la oscuridad, debieron absorber el oxígeno disuelto y trasformarlo en ácido carbónico.

Dadas las propiedades especiales de los rayos del espectro, podria suponerse que su accion en la asimilacion del carbono por las plantas deberia ser motivada principalmente por las radiaciones químicas; pero no es así. Los estudios que Daubeny, Draper, Cloetz, y Cailletet han hecho sobre este punto especial han demostrado, que á igualdad de intensidad luminosa, los rayos amarillos y rojos son los más eficaces, y los verdes, azules y morados mucho ménos activos por este concepto. La luz ménos activa es la verde; no suscita descomposicion alguna, y áun parece favorecer el desprendimiento de ácido carbónico. Habiendo colocado Cailletet bajo una campana de vidrio verde iluminada por los rayos directos del Sol una probeta que contenia aire puro y una hoja, obtuvo al cabo de muchas horas una cantidad de ácido carbónico poco menor que la que las mismas hojas hubieran producido en la oscuridad. «Probablemente consiste, añade, en esta propiedad singular de la luz verde que debe producir al poco tiempo el ahilamiento de las plantas en las cuales influye, el que la vegetacion sea por lo general lánguida y enfermiza debajo de los grandes árboles, por más que la sombra proyectada por estos sea poco intensa.»

La luz ejerce además en la vegetacion otro género de influencia que ya columbró Guettard en el siglo pasado y que Deherain ha sabido hacer patente. Guettard reconoció que las plantas evaporan más agua de dia que de noche, y que era preciso que les diese de lleno la luz del Sol para que llegaran á su máximum de evaporacion. Deherain hizo una serie de experimentos minuciosos de los cuales resultó que la luz, y no el calor, es la causa de la evaporacion del agua por las hojas, reconociendo además que los diferentes rayos del espectro no tienen el

mismo grado de influencia en el fenómeno, pues los luminosos, eficaces para producir la evaporacion, son precisamente los que suscitan la descomposicion del ácido carbónico, lo cual se comprueba, ó con el aparato representado en la figura 198, en el que las hojas encerradas en tubos de cristal están expuestas á distintos rayos del espectro, ó rodeando simplemente los tubos de manguitos que contengan diversas soluciones coloreadas (fig. 197).

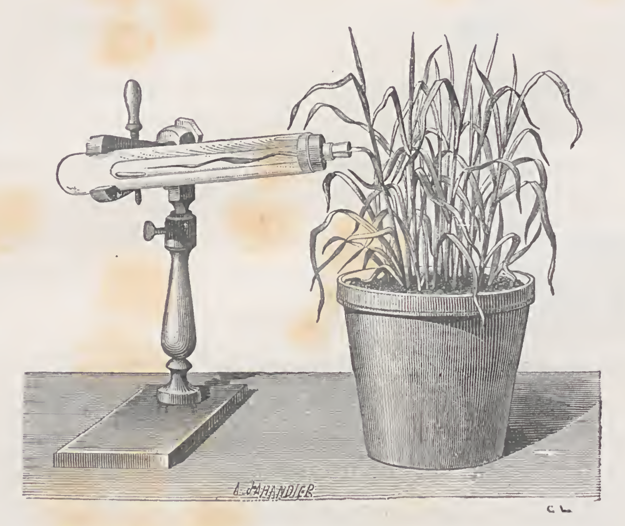


*Fig. 197.*—Influencia de los rayos de diversos colores en la evaporacion de las hojas

Así pues, dos de los fenómenos más importantes de la vida vegetal se hallan bajo la influencia directa de las radiaciones luminosas: por una parte la descomposicion del ácido carbónico, de lo cual se sigue la asimilacion del carbono por la planta; por otra, la evaporacion por las hojas, que desempeña un papel preponderante en el trasporte de los principios inmediatos de un punto del vegetal á otro. De aquí resulta que de dos años igualmente calurosos, pero caracterizado uno de ellos por los frecuentes nublados y el otro por la limpidez de la atmósfera, el segundo es más favorable para la vegetacion. Deherain cita algunos hechos en apoyo de esta conclusion, y recuerda un párrafo del *Cosmos* en el que Humboldt indica la importancia de la luz para el desarrollo de la vida vegetal.

«Si allí donde los mirtos crecen en plena tierra (Salcombe en las costas del Devonshire, Cherburgo en las de Normandía) y donde jamás subsisten mucho tiempo las nevadas en invierno, apénas bastan las temperaturas de verano y de otoño para que las manzanas lleguen á su madurez; si á la vid, para dar un vino potable, no le convienen las islas ni casi todas las costas, incluso las occidentales, no tan sólo consiste en la temperatura que reina en verano en el litoral; habiendo que buscar el motivo de estos fenómenos, no en las indicaciones de los termómetros colgados á la sombra, sino en la influencia de la luz directa, circunstancia que hasta el presente se ha tenido muy poco en cuenta, áun cuando se revela en una porcion de fenómenos. Hay por este concepto una diferencia capital entre la luz que ha atravesado un cielo sereno, y la debilitada y dispersada en todos sentidos por un cielo nebuloso.»

## II

### INFLUENCIA DE LA LUZ EN LA VIDA ANIMAL

La existencia y el desarrollo de la vida animal en la superficie de la Tierra están subordinados á la existencia y desarrollo de la vida vegetal. Este es un hecho tan evidente, tan palmario, que juzgamos inútil insistir en demostrarlo, de suerte que la luz, sin la cual no podria vivir niguna planta de clorofila, resulta indirectamente indispensable para la vida animal.

En cuanto á la influencia directa de la luz en esta ó aquella funcion esencial del animal, aunque todavía no se ha analizado y estudiado en su modo especial de obrar, existe sin duda alguna; el hombre y los animales sienten igual necesidad de luz para desarrollarse y vivir, para gozar de salud física en toda su plenitud.

¡Cuánta diferencia existe, por lo que al vigor y á la salud respecta, entre los pueblos que viven al aire libre y reciben con profusion los rayos del sol, y los que se aglomeran y oprimen en las callejuelas angostas y oscuras de las ciudades! ¡Qué contraste entre la vivacidad y la fuerza muscular de los hombres y de los animales que viven en las regiones tropicales, y la lentitud inerte de los lapones, de los samoyedos y del oso polar!

«Tenemos muchos ejemplos, dice Dubunfaut, de diferentes enfermedades, achaques ó accidentes que puede producir la privacion de luz, como por ejemplo, las enfermedades que atacan á los mineros, á los marinos que apénas salen de la sentina, á los obreros de las fábricas mal

alumbradas, á los inquilinos de los sótanos y cuartos bajos ó de las calles estrechas.

Conocidas son tambien las importantes observaciones de M. Edwards sobre los batracios y las de M. Humboldt sobre el vigor de los habitantes de las regiones equinocciales. Esos pueblos de piel roja, de formas musculosas y redondas, reciben directamente la benéfica influencia de la luz en sus cuerpos enteramente desnudos.» *(Estática de la luz en los fenómenos de la vida.)*

El escritor de quien hemos tomado las anteriores líneas sospechaba que la luz obraba sobre el organismo animal precisamente por medio de los rayos que carecen de eficacia para los fenómenos de la vegetacion.

«¿Acaso no son la clorofila y los glóbulos sanguíneos, dice, los dos grandes ejes sobre los que gira la vida orgánica de los vegetales y animales? Las condiciones de su vida semejantes al parecer, ¿no son perfectamente distintas, no están bien deslindadas por su respectivo

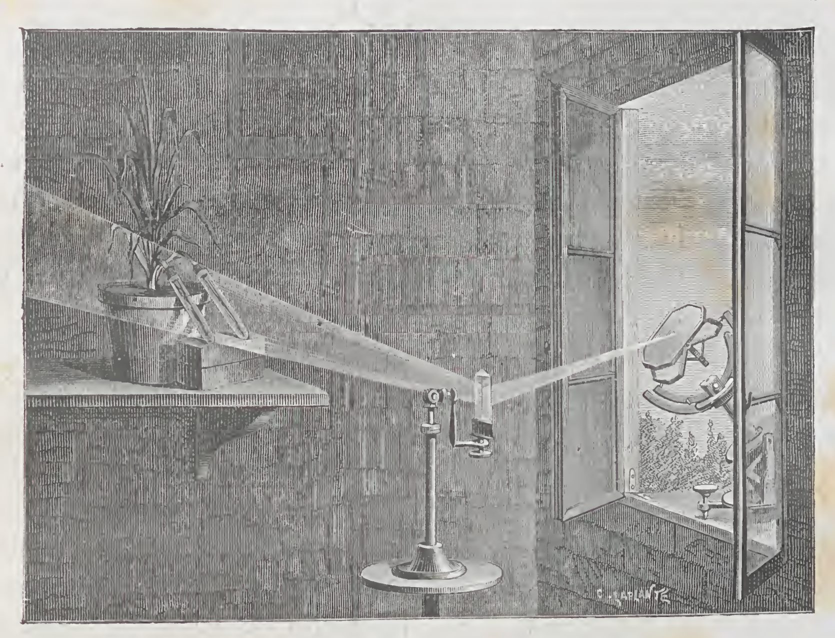


*Fig. 198.*—Experimentos de M. Deherain sobre la influencia de los rayos del espectro en el fenómeno de evaporacion de las hojas

modo de ser tan diferente por lo que al estímulo luminoso atañe? Es por consiguiente lógico y razonable deducir de todos los hechos conocidos y observados que la luz blanca del Sol, indispensable para la vida normal de los vegetales y animales, se divide bajo sus propias influencias en dos haces complementarios, que son absorbidos para satisfacer las necesidades de las funciones asimiladoras.»

Las investigaciones hechas con posterioridad sobre tan interesante punto no justifican al parecer enteramente las deducciones de M. Dubrunfaut. M. Beclard, el general americano Pleasonton, y por último Emilio Young han reconocido que los rayos más refrangibles, es decir, los morados, son los más propicios para el crecimiento de los animales. La luz verde, perjudicial para la vegetacion, debe de serlo tambien para la vida animal, de suerte que ambos reinos se reparten las radiaciones extremas, cosa muy natural, si se considera que la planta, para vivir y crecer, descompone el ácido carbónico del aire, exhala oxígeno y absorbe carbono, al paso que el animal absorbe oxígeno y desprende ácido carbónico. La diferencia de las funciones corresponde perfectamente á la diferencia de los modos de accion de las radiaciones luminosas.

# CAPITULO XIX

## LOS METEOROS OPTICOS

### I

### AURORAS Y CREPÚSCULOS

Cuando la atmósfera está despejada, su iluminacion ó el grado de su brillo depende de la distancia que hay de la region que se considera al Sol. A medida que este desciende ó se aproxima al horizonte, la iluminacion atmosférica disminuye; además, el color de la atmósfera, de azul que era al principio, pasa sucesivamente al amarillo y al rojo. Este efecto de coloracion tiene indudablemente por causa la absorcion de los rayos más refrangibles del espectro, absorcion debida al espesor cada vez mayor de las capas de aire atravesadas por la luz del Sol. La tinta azul procede de los rayos reflejados, y la amarillenta ó rojo-anaranjada de los trasmitidos.

Poco ántes de ponerse el Sol, el cielo adquiere en el zenit un matiz blanquecino, al paso que la iluminacion va creciendo por el horizonte occidental. Cuando el astro ha traspuesto el horizonte, el color encarnado del cielo persiste, presentando además, segun el estado de la atmósfera, los matices más variados, desde el rojo de fuego hasta el purpúreo oscuro. La iluminacion más ó ménos duradera de la atmósfera, lo mismo ántes del orto que despues del ocaso del Sol, es el fenómeno vulgarmente conocido con el nombre de *crepúsculo*, designándose más comunmente el de la mañana con el de *aurora* ó *alba*.

La duracion del crepúsculo es muy variable segun la época del año y el estado del cielo, y tambien segun los climas. Si admitimos con los astrónomos que la aurora empieza ó que el crepúsculo termina, por la mañana, cuando la luz atmósferica ofusca las estrellas de sexta magnitud, ó por la noche cuando aparecen las mismas estrellas (por supuesto para las vistas regulares), la observacion demuestra que en uno ú otro momento el centro del Sol se halla á 17° ó 18° de distancia angular bajo el horizonte. Hay sin embargo cierta diferencia entre el crepúsculo vespertino y el matutino, la cual consiste en que la duracion del segundo es algo menor, circunstancia que se atribuye á la mayor pureza de la atmósfera, por haberse precipitado en gran parte los vapores de que estaba saturada de noche, á causa del enfriamiento nocturno.

Defínese la duracion astronómica del crepúsculo diciendo que es el tiempo que el Sol invierte en descender 18° bajo el horizonte, y de este modo se comprende por qué, en un lugar dado, sea la época de los equinoccios la que corresponde á los crepúsculos más cortos, y la de los solsticios á los más largos. El arco descrito en su paralelo por el Sol es una fraccion de la circunferencia diurna total tanto mayor cuanto más diste dicho paralelo del ecuador celeste; por consiguiente, el tiempo que invierte en recorrerlo va en aumento desde la época de los equinoccios á la de los solsticios. Por una razon análoga, los crepúsculos van alargando á medida que se pasa desde el ecuador á regiones de latitud más elevada; la oblicuidad creciente de los arcos diurnos del Sol explica entónces la mayor duracion crepuscular. Esta llega á su máximum en las zonas polares, no siendo en rigor la noche de las regiones próximas al polo sino largos crepúsculos. Lo propio sucede á corta diferencia en nuestra zona templada en la época del solsticio de verano, pues no encontrándose el Sol más que á 17° bajo el horizonte, el dia de dicho solsticio á media noche, puede decirse que el crepúsculo dura toda ella.

Conviene sin embargo añadir que las circunstancias atmosféricas disminuyen unas veces y aumentan otras estas diferencias. Si el cielo está cargado de vapores, los crepúsculos se

alargan; si el aire es seco y la atmósfera está serena, disminuye su duracion, y sólo de este modo es posible darse cuenta de la notable diferencia que se observa entre las duraciones reales de los crepúsculos y las que resultan de su definicion astronómica.

«En el interior de Africa, dice Kœmtz, en donde el aire es á veces tan puro y trasparente que Bruce veia en el Sennaar el planeta Vénus en mitad del dia, se hace de noche inmediatamente despues de la puesta del Sol. En las regiones intertropicales el crepúsculo es todavía más corto; dura un cuarto de hora en Chile segun Acosta, y unos cuantos minutos en Cumaná, segun Humboldt; observándose el mismo fenómeno en la costa occidental de Africa. Estos resultados difieren notablemente de los indicados por el cálculo, pues segun ellos, el crepúsculo deberia durar por lo ménos una hora.»

Despues de la puesta del Sol se suele ver en el horizonte opuesto ó sea en el oriental un segmento de matiz azulado oscuro, limitado en su parte superior por una tinta ligeramente purpúrea. El espacio que separa este segmento del cielo es á veces blanco-amarillento; dásele el nombre de *curva crepuscular*, y su punto más alto, opuesto siempre á la direccion del Sol en el momento de la observacion, va elevándose progresivamente á medida que el astro desciende más y más bajo el horizonte.

La curva crepuscular no es otra cosa sino el límite de los puntos que reciben la luz del Sol y nos la envian por reflexion; es la línea de separacion entre el cono de sombra que la Tierra proyecta tras sí y la superficie límite de la atmósfera; el segmento oscuro que se ve á oriente lo forman las partes de la atmósfera que no reciben la luz solar. Debe admitirse sin embargo que estas partes iluminadas de tan diversos modos reflejan á su vez su luz en el interior del cono de sombra y que estas reflexiones sucesivas ensanchan necesariamente los límites del resplandor crepuscular.

Se ha procurado deducir la altura de la atmósfera de la del punto culminante de la curva crepuscular, á la hora en que esta curva es suficientemente limitada y distinta. El tiempo transcurrido desde la puesta del Sol permite calcular fácilmente la distancia angular á que en tal momento se encuentra el astro bajo el horizonte; y para averiguar en cuánto excede verticalmente el punto culminante de la longitud del radio terrestre basta un sencillo problema de geometría y de cálculo. Aprovechando Biot las observaciones hechas por Lacaille, ha deducido que dicha altura llegaba á unos 59 kilómetros en la hipótesis de que los rayos solares no hubieran experimentado reflexion alguna, y que era de ménos de 11 kilómetros suponiendo dos reflexiones sucesivas, por lo cual creia que la altura de la atmósfera estaba comprendida entre estos dos límites. Hoy se han deducido cifras más crecidas valiéndose de otros métodos, lo cual induce á creer que el de que acabamos de hablar no es muy exacto.

Terminaremos este artículo copiando de Kœmtz, que á su vez ha reunido las observaciones populares de marinos y labriegos, las indicaciones ó pronósticos del tiempo segun el aspecto del cielo durante los crepúsculos y las auroras.

«Las apariencias del crepúsculo, dice, dependen del estado del cielo, resultando por lo tanto que pueden servir para pronosticar hasta cierto punto el tiempo que hará al dia siguiente. Cuando el color del cielo es perfectamente azul y despues de la puesta del Sol la region occidental se tiñe de un ligero matiz purpúreo, se puede asegurar que hará buen tiempo, sobre todo si el horizonte parece cubierto de una leve humareda. Despues de llover, las nubes aisladas coloreadas de encarnado y bien iluminadas presagian que volverá á hacer buen tiempo. Un crepúsculo blanco-amarillento, sobre todo cuando este color ocupa una gran parte del cielo, no anuncia buen tiempo para el dia siguiente. En opinion de los campesinos, habrá tormentas cuando el Sol es de un blanco deslumbrador y al ponerse le rodea una luz blanca que apénas permite distinguirle; y el pronóstico es todavía peor cuando algunos ligeros *cirrus*, que dan al cielo un aspecto descolorido, parecen más oscuros hácia el horizonte, y el crepúsculo presenta un color rojo-ceniciento entre el cual se ven porciones rojo-oscuras que pasan al gris y que apénas permiten distinguir el Sol: en este caso el vapor vesicular es muy abundante, y es de temer viento y lluvia inminente.

»Las señales deducidas de la aurora son algo diferentes; cuando aparece muy encendida es

probable que llueva, al paso que una alborada cenicienta anuncia buen tiempo. La razon de esta diferencia entre una aurora y un crepúsculo gris consiste en que por la tarde esta coloracion depende principalmente de los *cirri* y por la mañana de un *stratus* que se disipa en breve ante los rayos del Sol levante, al paso que los *cirri* son más densos de noche. Si al salir el Sol hay bastantes vapores condensados para que dicho astro parezca rojo, es muy probable que en el trascurso del dia la corriente ascendente produzca la formacion de un espeso manto de nubes.» *(Meteorología.)*

## II

### EL ESPEJISMO

La refraccion de los rayos luminosos que han de atravesar las capas enteras de la atmósfera, ó sólo algunas de ellas, da orígen á muchos fenómenos, de los cuales hemos descrito ya el de la elevacion aparente de los objetos sobre su posicion real, ó sea lo que se llama refraccion atmósferica. El *espejismo* es un fenómeno que tiene la misma causa. Se le observa principalmente en la superficie de los arenales, cuando los rayos del Sol han caldeado fuertemente el suelo. El viajero que recorre esas abrasadas llanuras ve entónces los objetos que descuellan á bastante altura, reflejados como en una sábana líquida. La ilusion es tan grande, que los que por primera vez lo han presenciado, no pueden ménos de creer que hay real y verdaderamente un lago en los límites del horizonte. Los soldados franceses de la expedicion á Egipto se dejaron engañar más de una vez por tan falaz apariencia. Abrumados de cansancio y de sed, observaban cómo se iban alejando las orillas del suspirado lago á medida que ellos se acercaban, reproduciendo para aquellos infelices, en forma no ménos desconsoladora, el suplicio de Tántalo. Monge, uno de los sabios que componian el Instituto de Egipto, fué el primero en dar una explicacion completa del espejismo, el cual no se observa únicamente en los desiertos africanos.

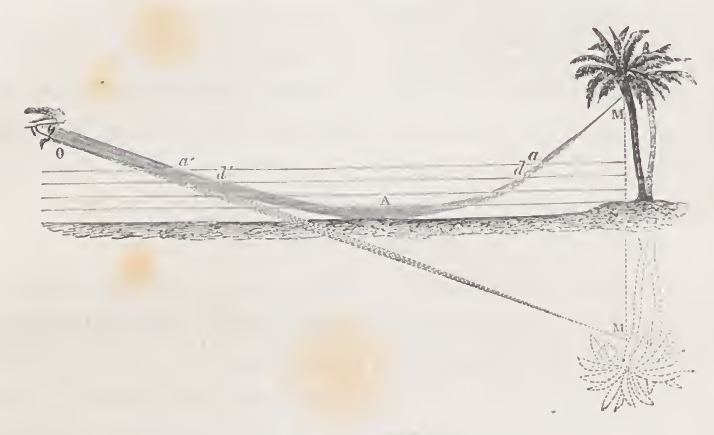



*Fig. 199.*—Explicacion del espejismo

En concepto de dicho físico, la teoría del espejismo es la siguiente.

Al llegar los rayos solares á la superficie del arenal, lo calientan sobremanera, despues de haber atravesado las capas de aire superpuestas sin elevar notablemente la temperatura, por ser muy débil el poder absorbente de los gases en proporcion al de los cuerpos sólidos. Pero el calor del suelo se comunica por contacto á la capa de aire más baja y de ésta pasa sucesivamente á las que hay sobre ella. El aire dilatado propende á elevarse en virtud de su ligereza específica; pero si el suelo presenta una superficie de nivel casi horizontal y la atmósfera está tranquila, el equilibrio subsiste, y sólo se forman leves corrientes producidas por ciertas desigualdades en la dilatacion de las diversas porciones de la capa de aire inferior. De aquí resulta que al medio dia, las capas de aire se colocan de arriba abajo por órden de densidades decrecientes. Supongamos ahora que del punto M de un objeto remoto se dirige oblicuamente al suelo un haz luminoso (fig. 199). Al pasar de un medio más denso á una capa de aire enrarecida sufrirá una desviacion alejándose de la vertical, de *a* á *d*, desviacion que irá en aumento á medida que encuentre capas cada vez ménos refringentes, hasta que, cayendo en A sobre una capa con cuya superficie forma un ángulo igual

al ángulo límite, sufrirá la reflexion total. A partir de dicho punto, seguirá una marcha inversa, acercándose más y más á la vertical y llegando en O á la vista del observador, que vera entónces una imágen del punto M en M', punto de convergencia de los rayos que forman el haz. Aplicándose la misma marcha á todos los puntos del objeto,—en nuestro ejemplo es un árbol,—parecerá éste reflejado como en un espejo, y el observador verá su imagen al revés. El cielo se refleja del mismo modo, de lo cual resulta la apariencia brillante del suelo á cierta distancia del objeto, apariencia que hace creer que hay una sábana líquida al pié de éste.

Tambien se presenta el fenómeno del espejismo en la superficie del mar, cuando la temperatura del agua es más elevada que la del aire, siendo su explicacion la misma que la del espejismo en la superficie de la tierra. Cuando las capas de aire desigualmente caldeadas, en vez de estar separadas por superficies horizontales, lo están más ó ménos oblicuamente, resulta el espejismo *lateral*, que se observa sobre todo en los países montañosos, ó en las inmediaciones de los edificios, en cuyo caso los objetos parecen reflejados como en un espejo vertical. Tambien puede suceder, como se observa á veces en el mar, que la imágen del objeto, por ejemplo de un barco, se forme por cima de él. El hijo del célebre navegante y físico Scoresby ha sido testigo en los mares polares de este último fenómeno, al cual se da el nombre de espejismo *inverso*. Cierto dia vió en el aire la imágen invertida de un buque en que iba su padre y del cual le habia separado un temporal, y esta imágen era bastante detallada para que le fuese dable conocer el barco, por más que á la sazon estuviese enteramente oculto tras el horizonte. Para explicar este fenómeno, es preciso suponer que á cierta altura hubiese en la atmósfera capas de aire horizontales cuya densidad disminuyese rápidamente de abajo arriba.

## III

### EL ARCO-ÍRIS

De todos es sabido que el arco-íris aparece en el cielo enfrente del Sol, al través de las nubes que se resuelven en lluvia, y que unas veces es sencillo y otras le acompaña un arco exterior que por lo regular es ménos brillante que el primero. El *arco principal* ó *interior* forma una faja circular á lo ancho de la cual se ven todos los colores del espectro, desde el morado hasta el rojo, contándolos de dentro á fuera. El arco secundario, más ancho que el primero, presenta los mismos colores, pero en órden contrario, de suerte que el rojo está dentro, enfrente de igual color del arco principal.

Para formarnos idea de las condiciones que median para la formacion de este fenómeno, vamos á examinar cuál es la marcha seguida por un rayo solar, cuando cae en la superficie de una gota esférica de lluvia. Al llegar el rayo luminoso á la superficie de la esfera, se refracta, se aproxima á la vertical en el punto de incidencia ó del rayo, y va por una cuerda del círculo máximo hácia cuyo plano le suponemos dirigido. Al encontrar la superficie interior de la esfera líquida, se divide, emerge en parte, y se refleja por la otra. Otro tanto sucede á cada uno de los encuentros del rayo reflejado, cuya intensidad va disminuyendo á medida que ocurren estas reflexiones sucesivas. Conociendo el ángulo de incidencia del rayo luminoso, se puede calcular el ángulo de emergencia del rayo que sale de la esfera líquida, despues de una, de dos ó de varias reflexiones interiores.

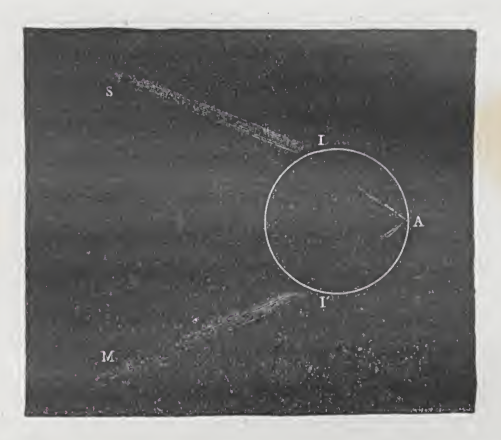



*Fig. 200.*—Marcha de los rayos eficaces en una gota de lluvia, despues de una sola reflexion interior

Si en lugar de un solo rayo de luz consideramos un haz como SI, como los ángulos de incidencia de los rayos que componen el haz no son los mismos, los rayos emergentes saldrán por lo comun de la esfera divergiendo, de suerte que al dispersarse por el espacio, no producirán ningun efecto en el ojo ni imágen alguna en la retina á una distancia un poco considera-

ble. Sin embargo, el cálculo demuestra que, para ciertas incidencias, los rayos emergentes forman un haz cilíndrico cuya intensidad continuará siendo la misma hasta regular distancia. Newton ha dado el nombre de *rayos eficaces* á los que poseen esta propiedad. Síguese de aquí

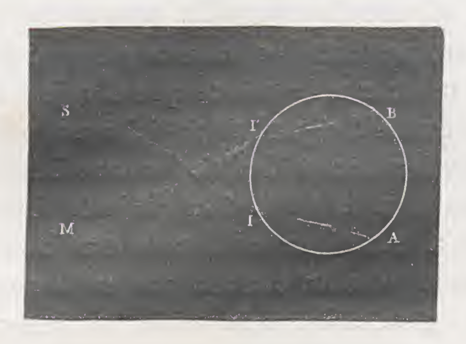



*Fig. 201.*—Marcha de los rayos eficaces despues de dos reflexiones interiores

que todas las gotas de lluvia que se hallen en situacion á propósito para enviar al ojo del observador sus rayos eficaces, parecerán más luminosas que las otras, y formarán en la nube una zona más brillante que las regiones vecinas.

Ahora conviene recordar que no poseen igual refrangibilidad los diferentes rayos coloreados de que se compone un haz de luz blanca. Las incidencias que corresponden á los rayos eficaces de cada color simple no son por tanto las mismas, de lo cual resulta que al salir el haz incidente de la esfera líquida se dividirá en tantos haces separados cuantos son los colores del espectro. Calculando los ángulos de incidencia para los rayos eficaces de los colores simples extremos, resulta, despues de una sola reflexion interior:

Para los rayos morados, un ángulo de incidencia de 58°40';

Para los rayos rojos, uno de 59°23'.

Y entónces, los ángulos que forman los rayos emergentes con la direccion de los incidentes son de 40°17' para los rayos morados, y de 42°2' para los rojos.

En caso de haber dos reflexiones interiores en A y en B, los ángulos de incidencia de los rayos eficaces son:

Para el morado, 71°26'; para el rojo, 71°50';
y las desviaciones sufridas por los rayos despues de su emergencia de la esfera líquida, son de 50°59' para los rayos rojos, y de 54°9' para los morados.

Con estos datos, se puede demostrar que el arco-íris principal está formado por los rayos solares que han sufrido una sola reflexion en el interior de las esferas líquidas que componen las gotas de lluvia; y el arco-íris exterior por los rayos que han pasado por dos reflexiones sucesivas. Sea OZ una línea paralela á la direccion de los rayos solares, y que pasa por la vista del observador situado de espalda al Sol. Mirando en la direccion O*a*, direccion tal que hace que el ángulo *a*OZ sea el de la desviacion de los rayos morados eficaces, llegará al ojo del observador un rayo morado procedente del rayo solar S*a* que se ha reflejado una vez en las gotas de lluvia cuando al caer pasan sucesivamente por el punto *a*. En efecto, el paralelismo

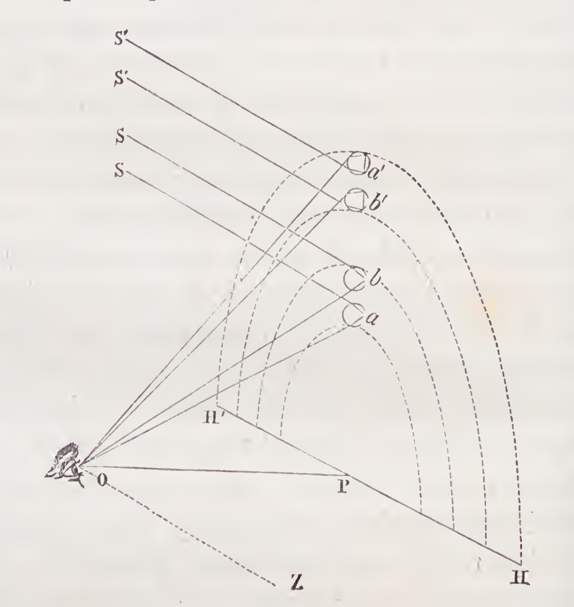



*Fig. 202.*—Teoría del arco-íris: arco principal y arco secundarlo

de las lineas OZ y S*a* hace que sean iguales los ángulos S*a*O y *a*OZ; pero este último es tambien por hipótesis igual al ángulo de desviacion que corresponde á los rayos eficaces morados. El rayo S*a* encontrará pues una gota de lluvia cuya posicion será la que conviene á la incidencia y á la emergencia calculadas, y el ojo verá un punto morado. Unos 2 grados más arriba, en *b*, verá un punto rojo, y en el espacio *ab* todos los matices del espectro comprendidos entre el rojo y el morado, esto es, el anaranjado, el amarillo, el verde, el azul y el añil. Pero ocurrirá lo propio indudablemente en cualquier otra direccion que forme con OZ los mismos ángulos acabados de indicar. El observador verá pues fajas de todos estos colores, proyectándose en el cielo en forma de círculos con-

céntricos que tienen su centro en la línea OZ, en un punto diametralmente opuesto al Sol.

Esto por lo que toca á los rayos solares que penetran en las gotas de lluvia y salen de ellas despues de reflejarse una sola vez. Los que han sufrido dos reflexiones llegarán al ojo formando con la línea OZ ángulos de 50°59′ si son rayos rojos, y de 54°9′ si morados. Los rayos eficaces de los colores intermedios estarán comprendidos entre estos rayos extremos. Pero se ve que aquí el rojo está dentro y el morado fuera.

Todos estos resultados se deducen del cálculo en virtud de las leyes de la reflexion y de la refraccion de la luz, y dado el índice de refraccion del agua. Ahora bien, las dimensiones angulares de cada arco-íris, la anchura de las zonas y la del intervalo que las separa son otras tantas consecuencias de los datos precedentes; y si la teoría es exacta, la observacion deberá comprobarlo así. Esto es lo que han hecho Newton y todos los observadores que posteriormente á él han estudiado el arco-íris. Cuando el Sol está en el horizonte, la línea OZ se encuentra en este plano. Por consiguiente el centro de los arcos se halla á su vez en el horizonte y el arco-íris aparece en forma de semicírculo, forma con que efectivamente se presenta al salir ó al ponerse el Sol, al observador situado en la llanura. Con respecto á las alturas diferentes de la del astro, la amplitud del arco-íris no llega á la de una semi-circunferencia, siendo esta amplitud tanto menor cuanto más elevado aparece. Por último, si el observador estuviera situado en una montaña muy alta, y en un picacho angosto, podria ver más de una semi-circunferencia, y hasta un círculo completo, si llueve á regular distancia.

La teoría demuestra que puede haber rayos eficaces que correspondan á 3, 4 y 5 reflexiones sucesivas y por lo tanto se deberia poder observar simultáneamente más de dos arco-íris.

El tercero y el cuarto se verian hácia el lado del Sol con diámetros de 39° y 45°. El quinto se observaria como los que hemos descrito, enfrente del astro solar. Mas al parecer no se ha notado ninguno de estos fenómenos indicado por la teoría, lo cual seguramente se explica por la disminucion considerable de intensidad que sufre la luz despues de reflejarse dos veces sucesivas.

Si la luz directa del Sol produce uno ó dos arco-íris concéntricos, la reflejada puede dar orígen tambien al mismo fenómeno. La superficie de una agua tranquila, la del mar, la de un lago, al dar una imágen viva del Sol, han permitido observar dos ó cuatro arcos que teniendo centros diferentes en una misma vertical se cortan dos á dos por ser naturalmente más elevados los arcos que emanan del Sol reflejado.

No debe olvidarse que el arco-íris es un fenómeno cuya formacion depende únicamente de la posicion del observador con respecto al Sol y á la nube que se resuelve en lluvia; si el observador cambia de sitio, el arco-íris hace lo propio, y en su consecuencia, si dos personas situadas á gran distancia entre sí ven á la vez un arco-íris, no observan el mismo arco. Si así fuese, la que estuviese situada oblicuamente, lo veria en perspectiva, en forma de óvalo ó elipse, pero no de círculo. La teoría y la observacion prueban de consuno la imposibilidad del hecho que acabamos de suponer. Muchas veces hemos oido asegurar á personas á quienes hablábamos de algun arco-íris, que ellas tambien lo habian visto, pero se equivocaban, á no ser que se hubieran hallado precisamente inmediatas al lugar en que nosotros estábamos en el mismo instante.

Cuando el arco-íris ordinario es muy brillante se notan á veces fajas de colores, ya dentro del arco interior, ó ya fuera del exterior. Dáse á estas fajas el nombre de *arco-íris supernumerarios*, y Young, Arago, Babinet, y Airy han formulado su teoría, que, como la de las *coronas*, relacionan con la difraccion de la luz.

## IV

### HALOS SOLARES—PARHELIOS, PARASELENES

En las regiones polares, y alguna que otra vez en las zonas templadas, se observa un fenómeno óptico bastante complicado, una reunion regular de círculos luminosos, de arcos tangentes á estos círculos que se forman alrededor del Sol, y lo mismo que el arco-íris, suelen presentar los varios colores del prisma.

Dáse el nombre de *halos* y de *parhelios* á estos fenómenos, que describiremos detalladamente.

Alrededor del Sol se forman dos círculos

concéntricos; el más pequeño llamado *halo menor* ó *halo interior*, tiene un radio de unos 22° á 23°; el mayor, ó *halo exterior*, es casi exactamente doble, es decir, tiene 46° de radio. Uno y otro, bastante difusos en su contorno, brillan con los colores del arco-íris, pero en ambos está el rojo á la parte de dentro y el morado á la de fuera. Por lo comun, los colores del halo de 46° son más marcados que los del otro. Un tercer círculo, paralelo al horizonte á todo el cual da vuelta, corta los dos primeros pasando por su centro: dásele el nombre de *círculo parhélico*, y difiere de los halos en que no es de colores, sino de un matiz blanco difuso. Visto el círculo parhélico cerca de los otros dos, parece un diámetro rectilíneo y prolongado de ambos, y los corta en cuatro puntos en los cuales se ven apariencias más luminosas y como imágenes difusas del Sol, de los mismos colores que los halos y rojas como ellos hácia el lado del centro. Estos *parhelios* ó *falsos soles* aparecen con más frecuencia en la interseccion del

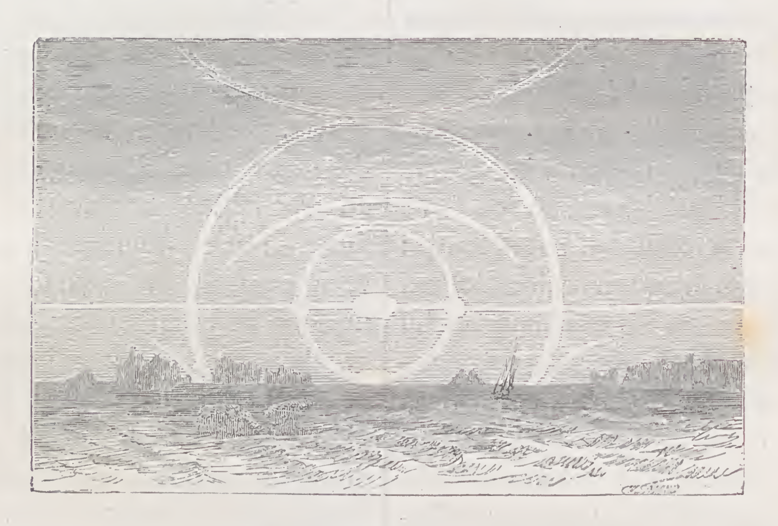


*Fig. 203.*—Halo solar, parhelios y círculo parhélico

halo interior y del círculo parhélico; son más raros y de colores más bajos en el halo exterior.

Aparte de esto, vense á veces arcos tangentes en los extremos superiores del diámetro vertical comun á los dos halos, arcos que tienen el zenit por polo, siendo por consiguiente paralelos al círculo parhélico, y estando coloreados como los dos halos. Por último, á veces sucede que aparecen otros arcos tangentes á cada lado de la parte inferior del halo de 46°, pero estos arcos laterales son sumamente raros.

Así como hay arco-íris nocturnos producidos por la luz de la Luna, tambien se ven *halos lunares*, que no difieren de los solares sino por su menor brillo ó por sus colores más bajos.

Aun cuando los halos sean más frecuentes de lo que se habia creido en un principio, con todo es muy raro que el fenómeno reuna todas las apariencias que acabamos de describir. Las observaciones más completas de que se hace mencion en los tratados son las siguientes: halo completo observado por Lowitz en San Petersburgo el 29 de junio de 1790; otro halo completo observado por Hoff y Kries en Gotha el 12 de mayo de 1824; otro visto en Noruega el 27 de marzo de 1826 por Schult, Hansteen y Segelke, y por último el 4 de octubre de 1839, Bravais y Martins vieron y describieron un halo solar en Pitea (Suecia).

Demos ahora una sucinta explicacion de estos singulares fenómenos. Huygens fué el primero que trató de formular la teoría del halo, suponiéndolo debido á ciertos glóbulos ó cilindros de hielo opaco rodeados de una capa de agua trasparente que hubiese en suspension en la atmósfera. Mariotte y Venturi la explicaron á mediados del siglo anterior, atribuyéndola á la refraccion de la luz en los cristales de nieve ó de hielo flotantes en el aire, cristales que existen en efecto y que por lo general son de forma prismática exagonal. Brewster, Arago, Frauenhofer y por fin Bravais, han aceptado y completado la teoría de Mariotte que basta para explicar todas las circunstancias del fenómeno.

Veamos ante todo cómo da cuenta del halo interior de 22°. La atmósfera está sembrada, entre el Sol y el ojo del observador, de una

muchedumbre de agujas prismáticas, que supondremos orientadas en todas direcciones. Dos caras laterales contiguas de uno de estos prismas forman entre sí un ángulo de 120°, ángulo demasiado grande para que algun rayo de luz pueda atravesarlas sucesivamente, por cuanto el que penetrara por una de ellas y cayera en el interior sobre la segunda, sufriria allí la reflexion total; pero no sucede lo propio con dos caras separadas por una tercera, porque entónces el ángulo es solamente de 60°. La luz que penetre en el prisma por una de estas caras y salga por la otra experimentará una desviacion igual por lo ménos á 21° 50' (ó sea 22°), ángulo de desviacion mínima para un prisma de hielo cuyo ángulo es de 60°.

De todas las agujas prismáticas orientadas de todos modos, consideremos aquellas cuyo eje es perpendicular á un plano cualquiera que pase por el Sol y por el ojo del observador: estas agujas enviarán á dicho plano luz refractada procedente de todas direcciones. Pero en una de estas la luz será más intensa que en todas las demás; direccion que será la que corresponda á los prismas orientados de modo que den la desviacion mínimum, lo cual sucederá por dos razones. Primero porque los prismas así dispuestos pueden girar ligeramente sobre su eje sin que la desviacion se modifique notablemente; lo cual equivale á suponer que los prismas orientados de este modo son más numerosos que los otros. Además, durante el movimiento de rotacion de los otros prismas, los rayos refractados que envian al ojo no hacen más que pasar rápidamente, miéntras que los refractados en el momento de la desviacion mínimum son cada vez más en número sin dejar de pasar por el ojo. Todos los rayos que, despues de refractarse en las agujas de hielo, lleguen á nuestra vista, pero sufriendo ántes su mínima desviacion, son los llamados *eficaces*, porque producen por sí solos círculos luminosos de colores que constituyen los halos. El mismo raciocinio es aplicable á todos los planos trazados por el Sol y por el ojo del observador, de suerte que todos los rayos eficaces formarán un cono, cuyo eje será la línea que reuna el ojo y el Sol.

Por consiguiente, se verá un círculo luminoso alrededor del astro solar á una distancia angular igual á la que mide el ángulo de desviacion mínimum para prismas de 60°, es decir, á 22° de distancia, y será el *halo interior*.

En cuanto á la coloracion del círculo, se explica con igual facilidad. Como sabemos, el índice de refraccion va creciendo del rojo al morado, y por lo tanto, los rayos solares, des-

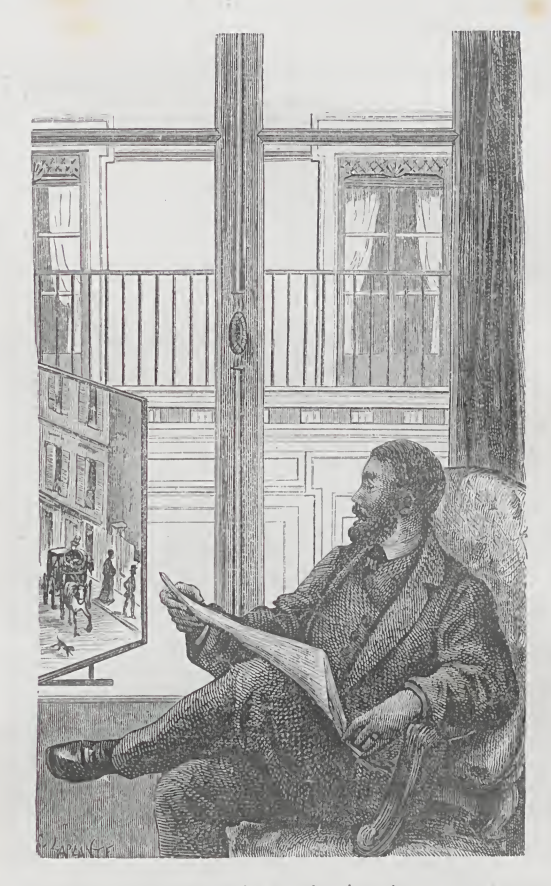


*Fig. 204.*—Espejo exterior ó espía

compuestos por la refraccion prismática, no tienen el mismo ángulo de desviacion mínimum, sino que este ángulo crecerá con la refrangibilidad de los rayos. Así pues, el círculo rojo estará rodeado de círculos amarillo, verde, azul, etc., cuyo conjunto constituirá el halo menor ó interior.

Por lo que respecta al exterior ó de 46°, tiene por causa la refraccion de los rayos solares que atraviesan los prismas de hielo al pasar de una cara lateral á uno de los exágonos de la base. Siendo de 90° el ángulo de estas caras, la desviacion mínimum de los rayos medios es de 45° 44'. De aquí resulta un círculo cuyo radio ó distancia angular al Sol es de unos 46°: es el *halo exterior*.

# PARTE SEGUNDA

OPTICA.—APLICACION DE LOS FENOMENOS Y DE LAS LEYES DE LA LUZ

## CAPITULO PRIMERO

LA LUZ Y LA VIDA

### I

LOS ESPEJOS

El uso de los espejos es muy antiguo. Sin necesidad de remontarnos á los tiempos de Moisés, y al pasaje del *Exodo* en que se trata de los espejos de las mujeres que permanecian á la entrada del tabernáculo, sabemos que los antiguos egipcios los usaban tambien. En Grecia y en Roma se adornaban las paredes de las habitaciones con placas bruñidas y relucientes de acero, oro, plata, obsidiana y piedra especular; y á juzgar por lo que se desprende de varios párrafos de Plinio y Aristóteles, no fueron desconocidos de los antiguos los espejos de cristal forrado de una lámina metálica.

Hasta el siglo XV no reemplazaron á los espejos de metal bruñido las placas de cristal azogado, habiéndose fabricado los primeros en Flandes, y despues en Venecia, que tanta fama alcanzó por su superioridad en esta clase de industria. En un principio, y por espacio de mucho tiempo, sus dimensiones fueron muy reducidas, pues el arte de construir grandes piezas data solamente de fines del siglo XVII, época en que se fundó la magnífica fábrica de Saint Gobain. Nadie ignora cuán difundidos están hoy, cuán general se ha hecho su uso, ya para el tocador, ó ya para la ornamentacion interior y áun para la exterior. Si las lunas de los espejos tienen el inconveniente de ser sumamente frágiles, tambien gozan de inmensa superioridad sobre los objetos metálicos, cual es la de ser inalterables ó poco ménos, al paso que aquellos se oxidan, se empañan y exigen gastos crecidos para su mejor conservacion.

Hoy las fábricas de espejos producen lunas de grandes dimensiones y de tersura perfecta que no cede en nada á la belleza de la misma sustancia trasparente. Cuanto más blanca ó mejor dicho, cuanto más incolora es esta sustancia, tanto más perfecta es la luna, porque entónces los rayos luminosos, que deben atravesar dos veces su espesor para llegar á la vista, despues de reflejarse en la superficie bruñida del azogado, no cambian de tono y se debilitan muy poco á causa de dicho doble paso.

Digamos una palabra acerca de la superficie reflectora de las lunas ó cristales *azogados*, superficie que no es el cristal mismo, como es sabido, sino una lámina tenue de una amalgama de estaño, que se aplica á la cara posterior del cristal. Hé aquí cómo se efectúa esta operacion. Sobre una mesa de piedra bien lisa, rodeada de pequeños canales, se extiende la hoja de estaño, cubriéndola en seguida con un baño de azogue. Se limpia perfecta y cuidadosamente la luna y se la desliza sobre la capa de mercurio, de modo que se aparte á uno y otro lado el excedente del metal líquido; en seguida, poniendo algun peso sobre aquella, se consigue la adherencia de las dos láminas metálicas amalgamadas á la cara del cristal que pesa sobre ellas.

Esta operacion en que entra el azogue es perniciosa para la salud de los obreros que á ella se dedican, por lo cual se ha tratado de sustituir el azogado por el plateado, extendiendo al efecto sobre la superficie del cristal un com-

puesto de nitrato de plata, amoniaco y ácido tártrico. La plata tiene, como la amalgama de estaño, una gran potencia reflectora, pero el color de las imágenes resulta ligeramente amarillento.

En Bélgica, en otros países del Norte y áun en Francia hoy dia se suelen colocar fuera de las ventanas de las habitaciones espejos que, pudiendo girar sobre su eje ó sobre unos goznes, se les da la posicion que se desee, de modo que reflejen hácia el interior de la habitacion la imágen de lo que pasa por la calle. Estos espejos, de que se valen tambien los almacenistas y tenderos para vigilar desde detrás del mostrador los aparadores exteriores de sus establecimientos, se conocen con el nombre de *espías* (fig. 204).

Tambien se hace uso de grandes espejos azogados ó metálicos para hacer que penetre la luz del cielo en el interior de una habitacion oscura: por lo general, se ven estos reflectores en las calles angostas y sombrías de las grandes ciudades (fig. 205).

Cuando la luz se refleja en una superficie bruñida, pero trasparente, reprodúcense tambien las imágenes, pero muy débiles, porque una gran parte de la luz incidente atraviesa la sustancia. Hé aquí la razon de que los espejos ordinarios estén azogados por su cara posterior, resultando entónces las imágenes como sobre un cuerpo opaco sumamente bruñido. Pero tambien se puede hacer uso de las lunas sin azogar, que áun en este caso reflejan imágenes muy brillantes y de vivos colores, cuando los objetos que tienen delante están fuertemente iluminados y al propio tiempo el espacio que las rodea, sumido en una oscuridad relativa, recibe poca ó ninguna luz difusa. Tal es el principio de las apariciones fantásticas que se presentan en los teatros con el nombre de espectros, y á las que se apela con muy buen éxito en los dramas terroríficos.

Para ello se deja casi á oscuras la platea, y entre esta y el escenario se pone un gran cristal. Dando á éste una posicion inclinada (fig. 206), refleja la imágen de una persona, fuertemente iluminada por una luz que se dirige de lleno sobre ella desde el foso. El actor, á quien el espectador ve directamente en el escenario, y la imágen virtual, pero animada, del personaje que se halla en el foso, pueden mezclarse, confundirse, hasta el punto de producir en los espectadores la ilusion de que en realidad ha aparecido un fantasma inmaterial é impalpable. La necesidad de dar cierta inclinacion al cristal hace que el fantasma no parezca perfectamente en equilibrio, defecto que notan más especialmente los espectadores situados á los lados.

Antes de describir los instrumentos científicos basados en el fenómeno de la reflexion en la superficie de los espejos planos, mencionemos una aplicacion interesante y fácil de las leyes de la reflexion, la cual tiene por objeto medir las alturas verticales de los objetos, como

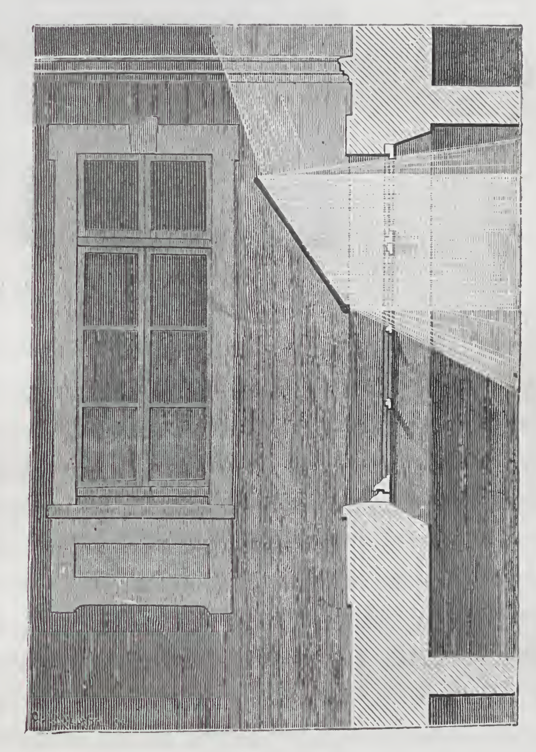


*Fig. 205.*—Reflector

árboles, casas, torres, etc. Colócase en el suelo y en posicion perfectamente horizontal, un espejito plano entre el objeto cuya altura se ha de medir y el ojo. En seguida se aleja el observador siguiendo la línea que reune el pié del objeto con el espejo hasta que ve en él la imágen A' de la cúspide A (fig. 207). En este momento fácilmente se comprende que la relacion entre la altura de la vista sobre el plano *b* y la de la altura de la cima A del árbol, es precisamente la que media entre la distancia horizontal *b O* y la distancia horizontal del pié del árbol en O. Una charca de agua no agitada por el viento produciria el mismo efecto, con una seguridad

más, la perfecta horizontalidad de la superficie reflectora.

En la *Primera Parte* de la Luz hemos descrito varias aplicaciones ingeniosas, recreativas ó útiles de la reflexion en los espejos planos, combinados entre sí de muchos modos: á ellos pertenecen el *anteojo mágico*, el *polemoscopio*, y el *kaleidoscopio*.

## II

### LOS ESPEJOS MÁGICOS

En estos últimos tiempos se ha hablado con frecuencia de cierta clase de espejos, á los cuales se ha dado el nombre de *espejos mágicos*, porque presentan un fenómeno particular y maravilloso á primera vista. Véase cómo los describe

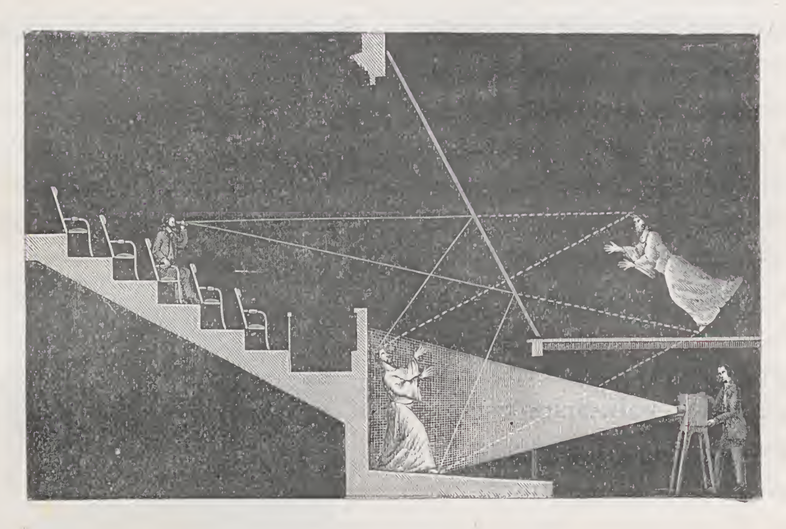


*Fig. 206.*—Colocacion de la luna sin azogar y posicion del fantasma

M. Bertin, en una conferencia que dió acerca de ellos en la Sorbona:

«Los pueblos del extremo Oriente, como los chinos y japoneses, no conocieron en lo antiguo más espejos que los metálicos, y áun hoy dia no fabrican otros. Este objeto de tocador es allí de bronce, de forma y tamaño variados, pero siempre portátil. Tiene una de sus caras bruñida y por lo regular convexa, de suerte que las imágenes aparecen más pequeñas: la otra cara es plana y ligeramente cóncava, y va siempre adornada de figuritas de relieve de un trabajo más ó ménos perfecto y hechas ya al fundir el metal (fig. 208). Un corto número de estos espejos resultan al ser fabricados con una propiedad maravillosa, á saber: cuando da un rayo de sol en la superficie bruñida y se refleja en una pantalla blanca, trasmite á esta pantalla la imágen de los adornos que hay en la cara posterior. En el Japon, de donde se reciben ahora estos espejos, ni el fabricante que los hace ni el comerciante que los vende conocen sus propiedades; pero los chinos son sabedores de ellas hace ya mucho tiempo y las aprecian, por lo cual les dan un nombre que significa «espejos que se dejan atravesar por la luz (theu-kuang-kien).» Nosotros los llamamos *espejos mágicos*.

Arago presentó en 1844 á la Academia de Ciencias uno de estos espejos, de los que Brewster habia propuesto doce años ántes una teoría, pero sin haber tenido el objeto en su poder y por consiguiente sin haber podido hacer ningun experimento. El físico francés dió en 1847 la verdadera explicacion del fenómeno. Vamos á resumirla brevemente, indicando ante todo cómo se hace el experimento.

Se puede utilizar simplemente la luz solar, exponer á los rayos del Sol la superficie bruñida del espejo, y recibir el haz reflejado en una pantalla blanca situada á cosa de un metro de distancia. El efecto es más intenso si se ilumina el espejo con luz divergente; el haz se dilata, puesto que la superficie del espejo es ligeramente convexa; se le puede recibir en una pantalla á mayor distancia: entónces la imágen del espejo aparece estampada en ella, y se ven con asombro los detalles de los adornos de relieve de la cara posterior del espejo, ó sea de la que no está iluminada, pareciendo estos detalles más luminosos que el fondo del espejo.

Un antiguo autor chino (del siglo XII) habia dado la siguiente explicacion del fenómeno; suponia que los relieves del reverso del espejo se habian reproducido en hueco en el anverso en el momento de fundirlo; que en estos huecos se habia introducido un bronce más fino que el del espejo, y que se habia bruñido en seguida la superficie, suponiendo debido el fenómeno á la desigualdad del poder reflector de los dos bronces. Brewster propuso sobre poco más ó ménos esta misma explicacion, pero posteriormente se ha reconocido que era inadmisible, por cuanto la superficie del espejo está amalgamada.

Hé aquí la verdadera teoría de los espejos mágicos.

Person observó que la superficie bruñida del espejo no era regularmente convexa, y que sólo las partes correspondientes á los huecos del reverso del espejo tenian esta regularidad. Las partes de dicha superficie que corresponden á los relieves, es decir, á los contornos de los dibujos de la cara posterior, eran planas. Resulta de aquí que los rayos luminosos que dan en las partes convexas van divergiendo á formar una imágen, aunque tenue, y relativamente oscura, del espejo. Los rayos del haz que se reflejan en las partes planas salen de ellas paralelamente y las imágenes que forman en la pantalla son

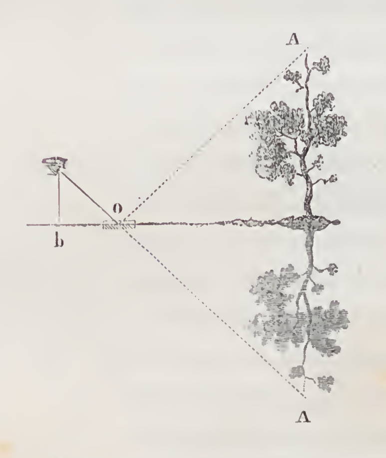



*Fig. 207.*—Medicion de la altura vertical de un objeto

más luminosas que las del fondo del espejo. Así se comprende que los dibujos se vean blancos en la pantalla.

La irregularidad de forma de que se trata procede del modo de fabricacion y del bruñido de los espejos. Segun M. Ayrton, ilustrado profesor de la Escuela de ingenieros de Yeddo, hé aquí lo que practican los fabricantes de espejos japoneses:

«Al salir el espejo de la fundicion en forma de disco plano, y ántes de bruñirlo, se le raya desde luégo en todas direcciones con un punzon, presentando como es natural más resistencia en las partes gruesas que en las delgadas. Esta operacion le hace ante todo ligeramente cóncavo, y se torna convexo á causa de la reaccion elástica del metal, siendo esta convexidad más perceptible en las partes delgadas que en las que corresponden á los relieves del dibujo.»



*Fig. 208.*—Espejo mágico japonés

Los experimentos recientes hechos por Govi en Italia y por Bertin y Duboscq en Francia han confirmado plenamente la explicacion dada por Person en 1847, y demostrado además que se puede aumentar la desigualdad de curvatura que engendra el fenómeno, sometiendo la cara posterior del espejo á una temperatura elevada, ó lo que da el mismo resultado, á una fuerte presion. Cuando se calienta el espejo por detrás, las partes delgadas se caldean con más rapidez que las gruesas; la presion produce el mismo efecto, y en ambos casos, son más marcadas las desigualdades de la superficie reflectora del espejo, siéndolo tambien el efecto mágico.

## III

### EL SEXTANTE

Dábase en otro tiempo el nombre de *octante* ó *cuadrante de reflexion* al instrumento que va-

mos á describir y del que se sirven los marinos para tomar las alturas de los astros ó las distancias angulares de la Luna y de las estrellas entre sí.

Inventólo Hadley en 1731, pero muchos sabios, entre ellos Newton, Hooke, Tomás Godfrey de Filadelfia y Harris, concibieron la idea de construir un instrumento semejante, basado en el mismo principio. Sin embargo, Hadley fué el primero que lo fabricó y que demostró su gran utilidad.

El sextante es una aplicacion de un principio muy sencillo de geometría y de física, que es á su vez una consecuencia inmediata de las leyes de la reflexion de los rayos luminosos (1).

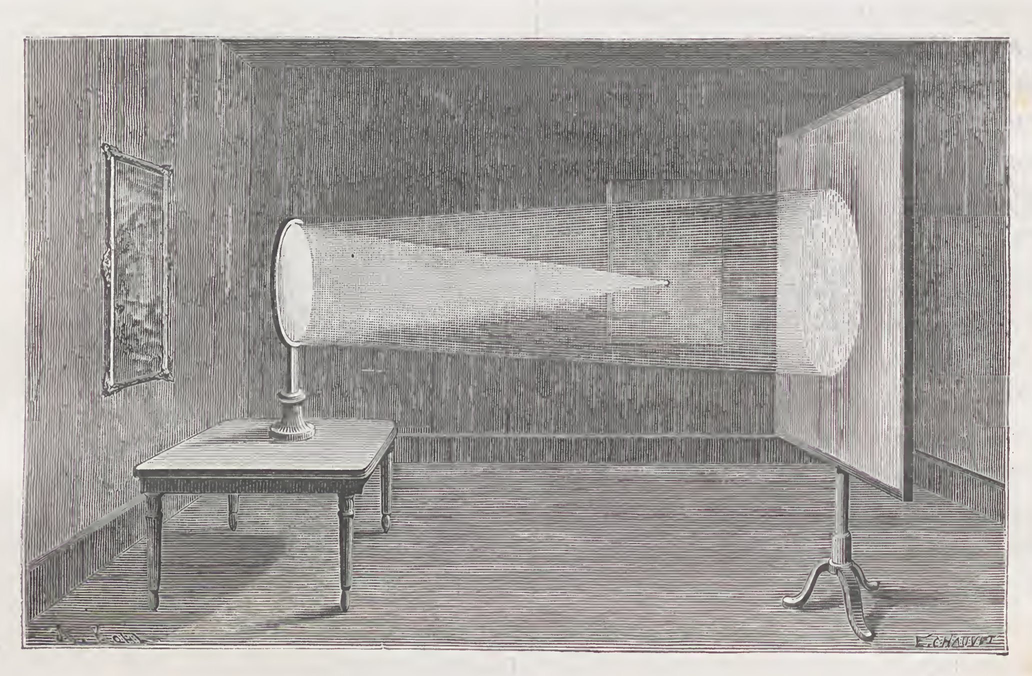


*Fig. 210.*—Experimento hecho con un espejo mágico

*Cuando un rayo de luz ha pasado ántes de llegar á la vista, por dos reflexiones sucesivas en dos espejos planos, el ángulo de desviacion de este rayo es rigorosamente doble que el ángulo de los dos espejos.*

Sea SI un rayo luminoso emanado de un foco, por ejemplo de una estrella; cae en I sobre el espejo M, refléjase allí, sigue la direccion IP, y va á parar á otro espejo N, donde se refleja de nuevo, y siguiendo la direccion Po, llega entónces á la vista.

El ángulo IOP es doble que el ángulo *a* que forman entre sí los dos espejos.

Hé aquí ahora la descripcion del sextante tal como se emplea hoy.

Se compone de un sector circular cuyo arco está dividido con cuidado en unos 60 grados, de lo cual procede su nombre de *sextante*, pues en otro tiempo sólo tenia 45 grados, ó sea la octava parte de la circunferencia, y de aquí su nombre primitivo *octante*: el que representa la figura 212 tiene 85 grados. El arco, que es una placa de metal bastante gruesa, está sólidamente unido al centro del sector, sobre el cual puede girar una plataforma provista de una alidada movible, la cual lleva un vernier V que permite leer las fracciones de grado en el limbo: *l* es un pequeño anteojo de aumento que sirve para este último uso. En el centro del sector y en la prolongacion de la línea del cero de la alidada movible, hay un espejo azogado M colocado perpendicularmente, y por lo tanto se mueve á la par de la alidada. En uno de los lados del sector y en direccion exactamente paralela al rayo que va á parar al cero de las divisiones del arco hay otro espejo fijo M';

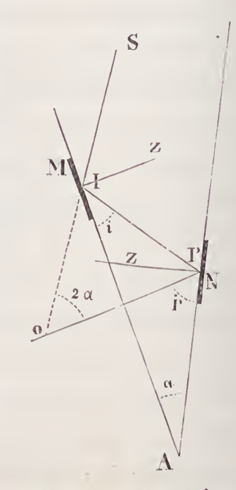



*Fig. 211.*—Principio teórico del sextante

(1) Ya hemos tenido ocasion de valernos de este principio al exponer el procedimiento ideado por Leon Foucault para medir la velocidad de la luz.

el cual sólo está azogado en la mitad inferior, siendo trasparente en la otra mitad.

Merced á un anteojo L fijado en el radio opuesto del sector se puede ver por trasparencia en su foco un punto situado en direccion LS', y por reflexion otro punto luminoso doblemente reflejado en I sobre el primer espejo, y en I' sobre el segundo. Cuando estas dos imágenes coinciden, claro está que el ángulo de los rayos luminosos SI, S'I' es doble que el ángulo de los dos espejos, en virtud del principio anteriormente expuesto. Luego el ángulo de aquellos es entónces precisamente igual al que forma la alidada movible con el cero del sextante.

Ahora se comprenderá fácilmente cómo se hace uso del instrumento.

El observador lo coge por un mango con la

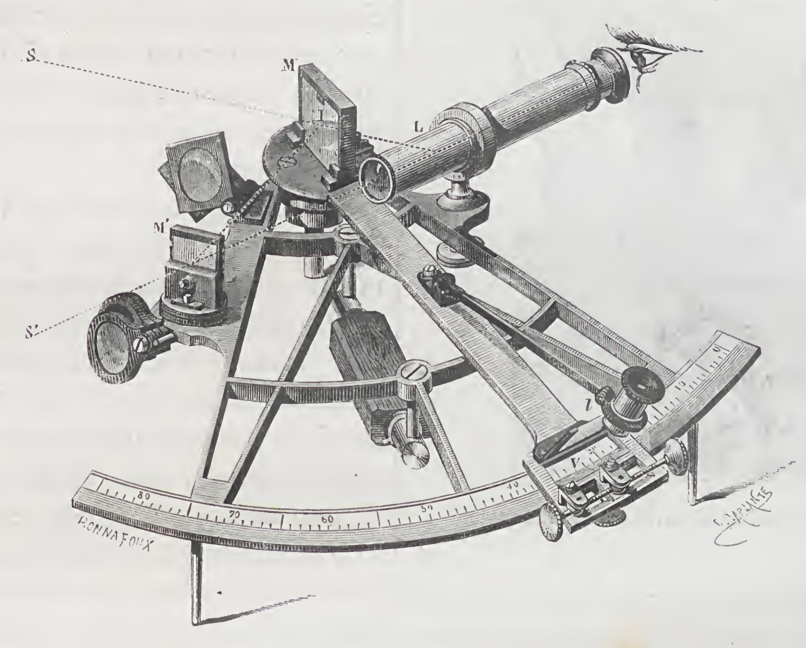


*Fig. 212.*—Sextante

mano derecha, y aplicando en seguida el ojo al ocular del anteojo, lo asesta á un objeto, por ejemplo á una estrella, al través de la parte no azogada del espejito. Enseguida hace girar el sextante alrededor de la línea de mira hasta que la otra estrella esté en el plano del sector. Entónces, dando vuelta á la alidada y al espejo mayor, hace que la imágen de la segunda estrella coincida, despues de dos reflexiones sucesivas, con la de la primera, en el centro del campo del anteojo.

«No tan sólo puede servir el sextante para observar la altura, sino tambien para medir la distancia angular de dos objetos situados en una posicion cualquiera relativamente al horizonte. No es menester instalarlo de ningun modo, pues se hacen las observaciones teniéndolo en la mano; así es que se le utiliza especialmente en el mar, por cuanto posee la preciosa propiedad de representar á la vez los dos objetos cuya distancia angular se desea conocer, y de reunirlos uno á otro como si no formaran más que un solo cuerpo, y esto á pesar de los movimientos del buque y del observador. Con él se hacen hoy casi todas las observaciones astronómicas tan necesarias para los marinos, ya las del tiempo y de la latitud tomando la altura del Sol y de las estrellas, ó bien las de las longitudes geográficas midiendo las distancias lunares.» (Brünnow, *Tratado de astronomía práctica.*)

Cuando se quiere medir la distancia angular de una estrella á la Luna, se asesta el sextante directamente á la estrella, y en seguida se hace que la imágen del borde del disco luminoso llegue á ponerse en contacto con la de la estrella. Si se trata de la distancia del Sol á la Luna, se pone la imágen del primero en contacto con la de la segunda; pero entónces hay que colocar vidrios de colores delante de cada espejo para atenuar la intensidad de los rayos del Sol, estando estos vidrios sustentados por ejes paralelos al plano del sextante, y formando grupos de tres ó cuatro cuyo color se consigue oscurecer más y más de este modo.

Por último, si la distancia angular que se

quiere medir es la de un astro sobre el horizonte, ó sea lo que se llama su altura, se tiene el sextante verticalmente, de modo que el astro esté en su plano, y se mira directamente con el anteojo el horizonte formado por la superficie misma del mar. Si falta este horizonte, se apela



*Fig. 213.*—Oficial de marina observando con el sextante

á uno artificial, bien sea un baño de azogue, ó bien una luna de cristal lisa puesta horizontalmente por medio de tres tornillos de nivel.

## IV

### LOS GONIÓMETROS

Hay en la naturaleza un gran número de cuerpos de forma geométrica determinada, y con frecuencia terminados en caras planas y lisas, reunidas de diversos modos. Estos cuerpos son los cristales. Los mineralogistas, que encuentran los cristales ya formados en las rocas, y los químicos que los obtienen por varios procedimientos, necesitan, para definirlos, conocer con precision los ángulos de las caras de un mismo cristal, lo cual consiguen valiéndose de unos instrumentos llamados *goniómetros* (del griego *gonia*, ángulo, y *metron*, medida), basados en el mismo principio, el de las leyes de la reflexion de los rayos luminosos. Y en efecto, las caras de los cristales suelen tener un poder reflector bastante grande para que se pueda considerar y emplear cada una de ellas como un espejo plano.

Los goniómetros de reflexion son bastante numerosos. Nos limitaremos á describir dos de los más usados, el de Wollaston y el de Babinet, inventados respectivamente por estos dos célebres físicos.

El goniómetro de Wollaston se compone de las piezas siguientes:

1.° D es un limbo vertical dividido en grados en su canto y movible sobre un eje horizontal que se puede hacer girar como se quiera por medio de una virola G. Un vernier V sujeto á la columna que sostiene el instrumento sirve para indicar el ángulo que se ha hecho girar al limbo.

2.° El eje del limbo está hueco y atravesado por una varilla que puede girar sobre sí misma, con entera independencia de aquel, por medio de otra virola A. Esta varilla sostiene una pieza articulada, la cual lleva á su vez una placa metálica, capaz de girar en diferentes sentidos por medio de un boton y ciertas articulaciones. En esta placa se coloca el cristal alguno de cuyos ángulos se desea medir.

Veamos cómo se efectúa esta operacion.

Se escogen dos puntos de mira horizontales paralelos, por ejemplo, la arista de un tejado y

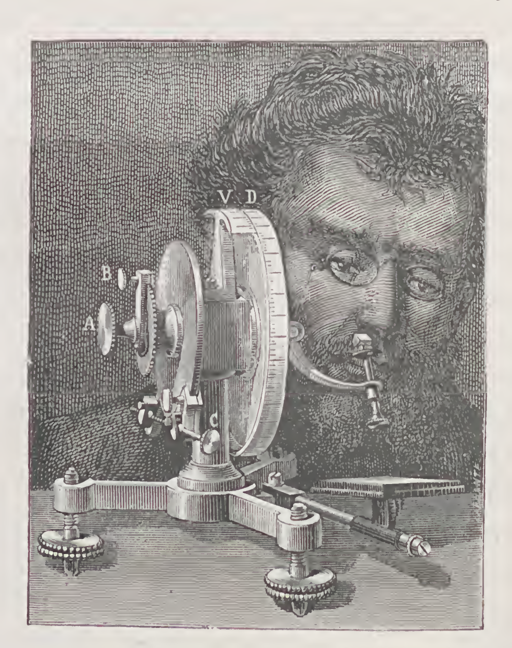



*Fig. 214.*—Goniómetro de reflexion de Wollaston

el barrote de la vidriera de un cuarto bajo, ó tambien la arista superior de una ventana abierta cuya línea oscura se destaque sobre el azul del cielo y el borde de una mesa ó el de una hoja de papel puesta sobre ella.

Hecho esto, se coloca el goniómetro en una

posicion tal que el limbo esté bien vertical (resultado que se obtiene con un nivel de aire y los tornillos de nivel del pié del aparato) y al propio tiempo en direccion perpendicular á las miras elegidas. Entónces se pone el cristal sobre la placa del instrumento sujetándolo con cera; siendo preciso colocarlo de modo que la arista del ángulo que se ha de medir sea á su vez perpendicular al limbo ó paralela al eje de rotacion. Para ello se utilizan las imágenes de las dos miras obtenidas por reflexion en las dos caras, imágenes que, para cada una de estas, deben ser bien paralelas entre sí.

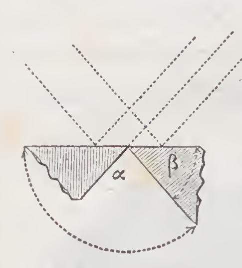



*Fig. 215.* — Principio geométrico del goniómetro. Angulo de rotacion del cristal.

Tomadas estas disposiciones preliminares, se hace que coincida el cero del limbo con el cero del vernier. Dando entónces vuelta al cristal con la virola A, se pone la imágen de la mira superior en coincidencia con la mira inferior vista directamente, ó mejor áun con la imágen de la primera mira reflejada en un espejito que se ve á la derecha fijado al pié del instrumento. Luégo con un boton estriado G se hace girar el limbo y por consiguiente el cristal hasta que se obtiene la misma coincidencia, pero esta vez en la segunda cara del cristal, el cual ha ocupado las dos posiciones que indica la figura 215, habiendo girado cada cara el ángulo *a*.

La lectura del ángulo de rotacion del limbo da en grados y en fracciones de grado, no el ángulo *beta* del cristal mismo, sino su suplemento geométrico *a*, del cual se deduce el primero mediante un sencillo cálculo.

El *goniómetro de Babinet* consiste en un limbo graduado horizontal, que lleva un *colimador* fijo á un radio del círculo: ó sea un anteojo con dos hilos cruzados en su eje óptico. Tiene además otro anteojo que por medio de una alidada provista de un vernier puede girar alrededor del centro, ó estar fijo en una posicion cualquiera con un tornillo de presion. Por último, en el centro del limbo hay una plataforma que puede girar alrededor de su eje vertical por medio de una alidada, la cual está provista de un vernier que sirve para medir el ángulo de rotacion. Sobre esta plataforma (que no es otra cosa sino una luna de cristal plana y tersa) se coloca el cristal, cuidando de poner la arista del ángulo que se ha de medir en el centro, dándole una posicion perfectamente vertical. Para cerciorarse de este último requisito, se verifica en muchas direcciones la perfecta coincidencia de las dos líneas rectas que forman la arista del cristal y su imágen en la luna.

Veamos ahora cómo se mide el ángulo.

Ante todo se pone el anteojo movible en una posicion que forme un ángulo cualquiera con el del colimador; se lleva el cero del vernier de la alidada enfrente del limbo y se da vuelta al soporte del cristal hasta que se vea en el anteojo que el hilo micrométrico colocado en su foco coincide con la imágen del hilo del colimador vista por reflexion en una de las caras del cristal.

En este momento se da vuelta de nuevo al cristal, pero esta vez con el auxilio de la alidada misma, hasta que resulta la misma coincidencia con la imágen reflejada vista en la otra cara del cristal.

El ángulo de reflexion, medido con el vernier de la alidada, es el de las dos perpendiculares á las caras reflectoras; de suerte que calculando el suplemento de este ángulo, se tendrá el de las dos caras del cristal.

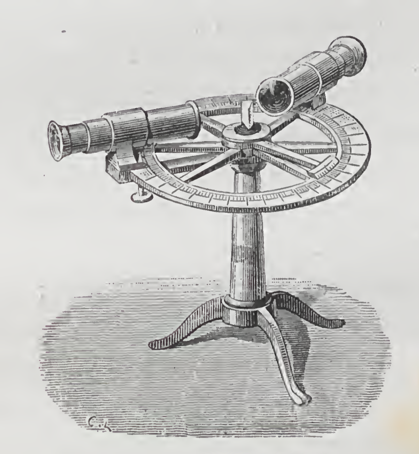


*Fig. 216.*—Goniómetro de reflexion de Babinet

La figura 216 representa un goniómetro de Babinet montado sobre un trípode; pero se fabrican otros más pequeños y sencillos que se pueden sostener con un mango.

Se puede utilizar el mismo instrumento en las investigaciones de óptica siempre que se emplean prismas cuyo ángulo se ha de conocer con exactitud, por ejemplo, cuando se quiere determinar el índice de refraccion de la sustancia de que está formado el prisma.

## V

### LOS HELIOSTATOS

En un gran número de experimentos de óptica es necesario proyectar en direccion constante un haz de luz solar, lo cual no permite obtener directamente el movimiento diurno del Sol en los experimentos de alguna duracion. Si el haz se recibe primeramente sobre un espejo plano desde el cual va á parar por reflexion al punto ó al objeto que se trata de iluminar, es preciso cambiar progresivamente la inclinacion del espejo para conservar al haz reflejado su direccion constante.

Consíguese esto con los *porta-luces*, aparatos que tendremos ocasion de describir más adelante, cuando tratemos del *microscopio solar*, y que consisten en un espejo susceptible de girar alrededor de dos ejes, uno horizontal y otro vertical, si el haz reflejado debe tener una direccion horizontal. Pero siempre es menester que intervenga el observador para modificar, en el sentido conveniente, la orientacion del espejo.

Los *heliostatos* son aparatos destinados á evitar esta intervencion; un aparato de relojería pone en movimiento constante el espejo, que es su pieza reflectora, y un mecanismo apropiado lo mantiene siempre en tal inclinacion, que los rayos solares reflejados en su superficie siguen una direccion constante, á pesar del movimiento diurno del astro.

Hay heliostatos de varias clases; aquí nos limitaremos á describir los que llevan los nombres de sus inventores Gambey, Silbermann y Foucault. Pero ántes daremos á conocer el principio comun á todos y sin el cual no se podria comprender su disposicion ni el juego de su mecanismo.

Suponiendo que la línea PP′ (fig. 217) representa el eje del mundo, línea de direccion invariable en torno de la cual tiene efecto el movimiento diurno del Sol y de las estrellas, el círculo S sera el curso aparente seguido por dicho astro en un dia, y el ángulo SOP la declinacion del Sol en la época que se considera. En A hay un cuadrante ecuatorial, en el cual marca á cada instante la sombra de la varilla ó estilo AO la hora del dia. La línea SOB indicará pues el camino seguido por un haz de rayos solares, y si se concibe que la OB gire alrededor del punto O siguiendo constantemente el extremo B del radio AB, esta será durante todo el dia la marcha de la luz incidente.

Sea RR la direccion en la cual se desea que se reflejen constantemente los rayos solares; la bisectriz NN' del ángulo S O R será la normal al punto de incidencia, lo cual determina la posicion que el espejo *mm* debe ocupar en el momento supuesto para que se efectúe la reflexion en la direccion apetecida.

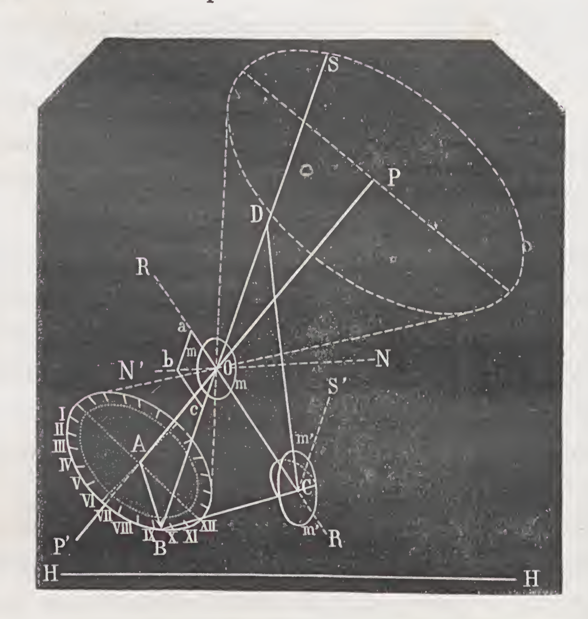



*Fig. 217.*—Principio geométrico de los sistemas de heliostatos

Así pues toda la cuestion consiste en mantener el espejo en una posicion relativa que sea siempre la misma, con relacion á la direccion constante de los rayos reflejados y la variable de los rayos solares incidentes. Esto se consigue de varios modos.

1.° Se pone encima del cuadrante ecuatorial un mecanismo de relojería que hace mover una aguja B A y describir una circunferencia entera en veinticuatro horas, por lo cual se encuentra siempre esta aguja en la direccion que ocuparia precisamente la sombra del estilo. A su extremo va unida una varilla B O á la cual se da en el cuadrante una inclinacion igual á la declinacion del Sol el dia de la observacion. Este es el primer requisito que reunen por igual los diferentes sistemas de heliostatos.

2.° La varilla O B lleva el espejo, está unida á un paralelógramo articulado O*abc*, cuya diagonal O*b* coincide con la bisectriz del ángulo SOR, es decir con la normal al punto de incidencia,

estando dirigido el lado fijo O *a* del paralelógramo en la direccion O R que se quiere dar al haz reflejado. Tal es el sistema de heliostato ideado por J. T. Silbermann, y representado en la figura 260.

3.° Sea O C (fig. 217) una varilla de longitud constante que puede tomar alrededor del punto O una posicion cualquiera, la que se desea dar al rayo reflejado. Esta varilla está hueca y lleva una horquilla á la cual está fijo el espejo *m' m'*, que tambien puede girar alrededor de O R y de A C. Otra varilla C D, situada en el plano del espejo, se articula con un anillo en D', en el estremo de una varilla O D' igual

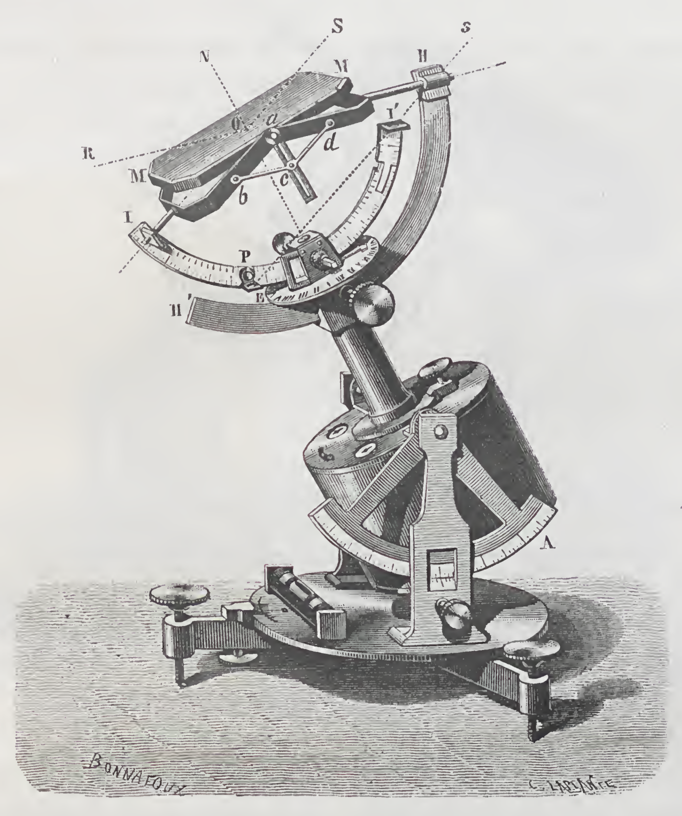


*Fig. 218.*—Heliostato de Silbermann

á O C. Un rayo S' C que caiga sobre el espejo paralelamente á S O se reflejará siguiendo la direccion C R. Tal es la disposicion del heliostato de Gambey.

4.° El espejo está sostenido en B por una varilla vertical á cuyo alrededor puede tomar todas las direcciones posibles, dirigido por otra varilla C B normal á su superficie y articulada en B con un anillo fijado en O B á una distancia OC=O B. Una tercera varilla C D', situada en su plano, tiene una ranura por la cual puede pasar la prolongacion O D' de O B. Los dos triangulos O C D y O B C' son siempre isósceles, de suerte que la perpendicular C B al espejo es paralela á O N, bisectriz del ángulo de los rayos incidentes y reflejados. Este es el principio del heliostato de Leon Foucault.

Sentados estos principios, ya es fácil comprender el mecanismo de los tres sistemas de heliostatos de Gambey, Silbermann y Foucault, reproducidos los dos últimos en las figuras 218 y 219.

## VI

### EL SIDEROSTATO

Los instrumentos usados en los observatorios para las investigaciones de astronomía física adolecen de un grave inconveniente, el cual consiste en que el observador tiene que cambiar de posicion juntamente con el ocular del anteojo segun el punto del cielo que estudia, y tambien con el movimiento diurno de rotacion que arrastra consigo á este punto. De aquí resulta que ha de tomar posturas incómodas, molestas y fatigosas, y en último resultado perjudiciales para el estudio del fenómeno observado.

Cuando se hacen observaciones con el anteojo meridiano ó con el teodolito, se apela á un prisma rectangular, en cuyo interior sufren los

rayos solares la reflexion total, permitiendo dirigir la imágen siempre en el mismo sentido: dáse el nombre de *anteojo roto* al instrumento en que se ha introducido esta modificacion. Pero esto no es una solucion aplicable á los anteojos ecuatoriales, instrumentos cuyo eje se desvia uniformemente alrededor del eje del mundo y va siguiendo la marcha del astro observado á medida que lo arrastra el movimiento diurno.

Con objeto de remediar este defecto y de evitar los inconvenientes que dejamos indicados, ideó Leon Foucault el instrumento á que dió el nombre de *siderostalo*. Este no es en rigor más que un anteojo astronómico cuyo eje óptico permanece invariable en posicion horizontal ante la cual refleja la imágen del punto del cielo que se trata de observar un espejo movido por un aparato de relojería y susceptible de ocupar á todo instante la posicion variable que exige el movimiento diurno. De este modo puede pasar el cielo entero, como quiera el observador, por delante del anteojo que permanece inmóvil, y aquél conserva aplicado el ojo, sin molestarse, al ocular del instrumento. Por consiguiente subsiste constante y horizontal la direccion del rayo reflejado.

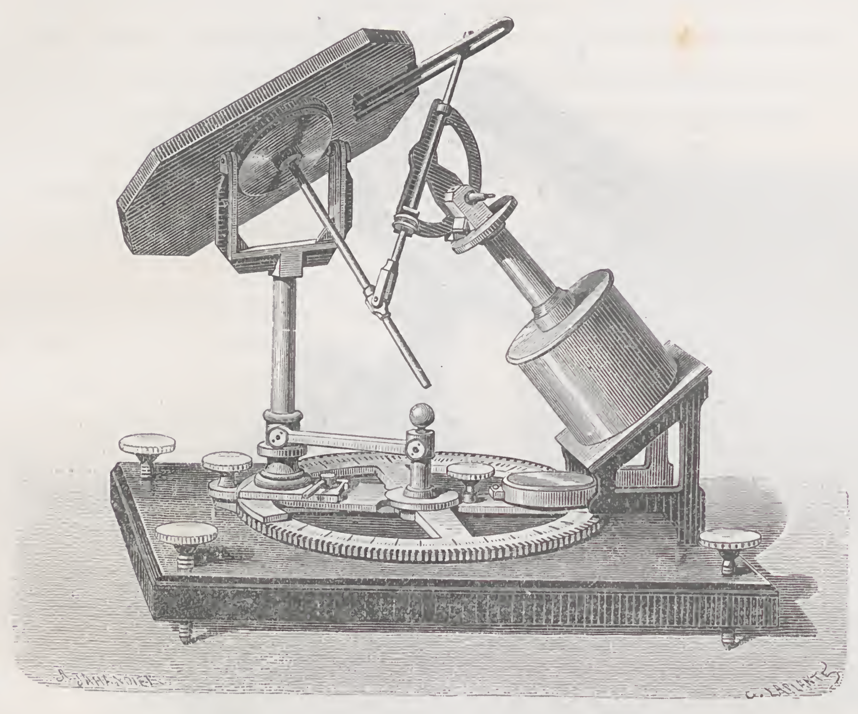


*Fig. 219.*—Heliostato de Leon Foucault

Examinando la figura 220 se comprenderá fácilmente su disposicion.

El espejo puede girar alrededor de un eje horizontal sustentado sobre dos montantes verticales que giran á su vez sobre una corona de ruedas macizas en torno de un eje vertical. Dicho espejo está sostenido por una barra perpendicular á su superficie que penetra en un anillo sujeto por una grapa cuyo eje da la direccion de los rayos incidentes del astro observado. Esta grapa está articulada en el otro extremo con la punta de un eje cilíndrico paralelo al eje del mundo y que, merced á una serie de ruedas y engranajes, gira sobre sí mismo con movimiento uniforme y con la velocidad angular del movimiento diurno.

Un círculo graduado permite fijar la direccion del eje de la grapa, de modo que el ángulo que esta forma con el eje del mundo sea igual á la distancia polar del astro. Dado el ángulo horario de este último para el momento en que el observador debe comenzar, se dispone el instrumento de modo que los rayos del astro vayan á caer en el plano que pasa por él y por el eje del anteojo, y el movimiento le deja allí en seguida miéntras dura la observacion.

Conviene advertir que la longitud de la grapa es precisamente igual á la distancia que media entre su eje de articulacion y el eje horizontal del espejo, de lo cual resulta que reuniendo la línea los puntos medios de ambos ejes,

prolongada más allá del espejo, da la direccion de los rayos reflejados. Esta direccion es, pues, constante; por lo regular se la inclina algunos grados bajo el horizonte para poder observar en caso necesario los astros muy inmediatos á él.

Una de las grandes dificultades de la construccion del siderostato consistia en el espejo plano, cuya superficie se ha de labrar de modo que presente la mayor perfeccion geométrica posible. En esto consiste la diferencia esencial entre el heliostato y el siderostato. En el primero, lo principal es obtener una direccion constante para los rayos reflejados; como lo que se estudia es la luz y no el foco luminoso, importa poco que aquella resulte ó no deformada. El siderostato, por el contrario, debe dar una imágen exacta, idéntica, del cielo mismo, de los astros, de su figura y de su movimiento. El difícil problema de la realizacion de un plano óptico ha sido resuelto por Leon Foucault merced á un método cuyos elementos entregó el hábil cuanto malogrado físico á su amigo Ad. Martin.

Hé aquí cómo aprecia M. Wolf las ventajas del nuevo instrumento: «No hay observador, dice, que no tenga que luchar con las dificultades que ofrece el adaptar á un anteojo ecuatorial un gran espectroscopio, cámaras fotográficas, aparatos de proyeccion ó de estudios fotométricos. Todas estas dificultades desaparecen empleando el siderostato. Los instrumentos de los gabinetes de física, cualesquiera que sean su peso, forma y volúmen, se pueden colocar delante del anteojo como delante del porta-luz de la cámara oscura, y el astrónomo estudia la luz de todos los astros en las mismas condiciones en que el físico ha estudiado la luz solar. Merced á él, se pueden realizar fácilmente muchos experimentos que parecian imposibles, y particularmente los que requieren la estabilidad perfecta del instrumento de medicion: por ejemplo, las determinaciones de las posiciones absolutas de las rayas espectrales y de las dislocaciones de estas rayas, las medidas fotométricas, etc.

»El espejo del siderostato, probado en el estudio del cielo con el excelente anteojo de Cauche de 16 centímetros de abertura y aumentos de 100 á 300 veces, no produce deformacion alguna en el haz procedente de una estrella bajo una incidencia de más de 45 grados.»

La pérdida de la luz ocasionada por la reflexion es escasa; segun los experimentos de Foucault no asciende, con respecto á la plata bruñida de los espejos, á más de $^{9}/_{00}$ de la luz incidente. Además, el pulimento dura mucho tiempo, y como es fácil platearlos de nuevo, se puede hacer esta operacion tan luégo como la superficie del espejo se deteriore. Pero bajo el punto de vista astronómico, el siderostato tiene un defecto más grave que el que puede resultar de la pérdida de luz: no se pueden explorar con él todas las partes del cielo, sino tan sólo las comprendidas entre el polo y el horizonte del lado del Sur. Para examinar las otras, seria preciso construir un siderostato de modo que reflejara los rayos al Norte.

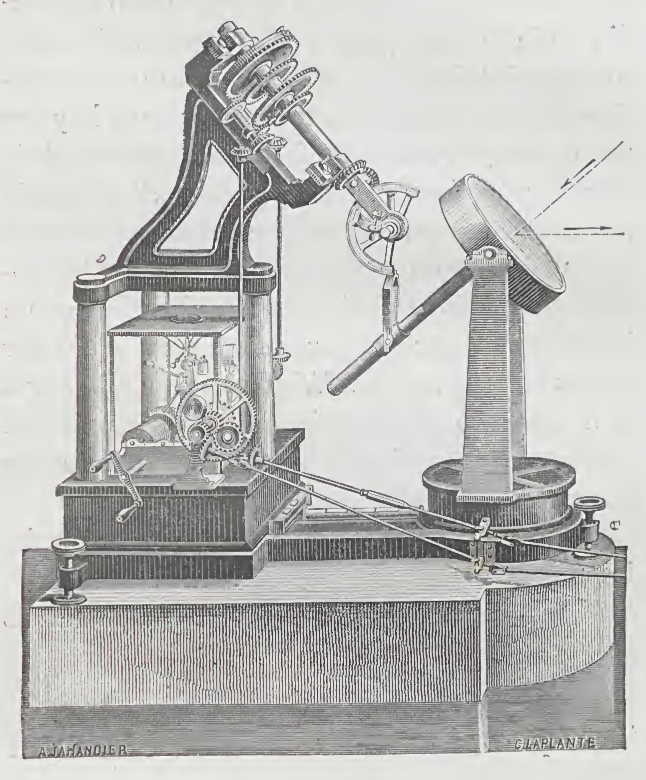



*Fig. 220.*—Siderostato

Una nota de H. Saint-Claire Deville, inserta en el tomo de las obras de Leon Foucault, expresa las esperanzas que habia concebido éste del uso futuro del siderostato, esperanzas que el inventor no debia ver realizadas, por cuanto no se construyó el instrumento hasta despues de su muerte. El sabio y malogrado físico empieza por poner de relieve en estos términos la utilidad del siderostato:

«La disposicion habitual de los instrumentos astronómicos, sean anteojos ó telescopios, no permite que se adapten á ellos fácilmente los aparatos necesarios para el estudio de las propiedades de la luz de los astros (fotometría, fotografía, polarizacion, espectroscopia). Además, la instabilidad de los ecuatoriales aumenta cuando se adaptan á ellos aparatos con frecuencia pesados y excéntricos que los desequilibran. El siderostato tiene por objeto remediar estos inconvenientes y facilitar al astrónomo el estudio de la luz del propio modo que el físico estudia la del Sol en la cámara oscura, empleando en este estudio instrumentos que hay en todos los gabinetes de física, sin necesidad de cambiar su forma ni su posicion. Si el espejo plano permanece inmóvil, se puede utilizar este aparato como un ecuatorial para medir las posiciones relativas de los astros. Tambien es un instrumento muy á propósito para construir cartas celestes, y M. Wolf trata de adaptar á él un aparato por medio del cual obtendrá el astrónomo inmediatamente la reproduccion de las cartas celestes.»

Luégo añade, recordando las esperanzas del inventor:

«Una de las aplicaciones más importantes del siderostato era la que queria darle M. Foucault para el estudio permanente del Sol. Se proponia colocar en una de las salas más concurridas de un observatorio un aparato que reprodujera en una pantalla cuadriculada una imágen fija y amplificada del Sol. La aparicion y la forma de las manchas, el paso de un asteroide por el disco solar, hubieran sido objeto de estudios continuos, hechos sin detrimento de la vista por todas las personas á quienes sus ocupaciones obligan á cruzar de continuo por dicha sala.

»M. Foucault queria emplear, para fotografiar el Sol, juntamente con el siderostato, un objetivo de larguísimo foco acromatizado para los rayos químicos. Un segundo espejo casi normal al haz refractado lo recibiria á una distancia igual á la longitud focal y haria que la imágen fuese á formarse en la pared anterior de la cámara oscura junto al mismo objetivo. El observador estaria así al alcance de la imágen y del espejo movible, á pesar de lo considerable de la distancia focal del objetivo.»

No habrá ciertamente quien no desee que este instrumento, puesto en manos de observadores ilustrados y hábiles, justifique las esperanzas que habia hecho concebir, facilitando los descubrimientos y los trabajos astronómicos.

# CAPÍTULO II

## LOS FAROS

### I

### SEÑALES MARÍTIMAS.—PRIMEROS FAROS DE REFLEXION Ó CATÓPTRICOS

Los antiguos no desconocieron el uso de los faros, como lo atestigua el fanal colocado en una elevada torre á la entrada de Alejandría y que, segun parece, subsistia aún en el siglo XII; el islote en el que estaba construida dicha torre dió su nombre al edificio que lo trasmitió á su vez á todas las luces encendidas en las costas para seguridad de los navegantes. Aunque habia pocos faros en la Edad media, se han multiplicado conforme ha ido adquiriendo desarrollo la navegacion, y hoy alumbran con sus variadas luces todas las costas frecuentadas por los buques de todas las naciones.

Apénas hace un siglo que se ha procurado aprovechar las leyes de la reflexion y refraccion de la luz para aumentar el alcance y el brillo de las luces de los faros. En otro tiempo no consistian estos más que en simples fogatas encendidas en lo alto de una torre y expuestas á la intemperie. Empezóse por reemplazarlos con lámparas resguardadas por vidrios; luégo se procuró hacer llegar á la mayor distancia posible su resplandor por medio de reflectores de metal bruñido, creándose de este modo los aparatos conocidos con el nombre de *faros de reflexion* ó *faros catóptricos*. Al principio su

éxito fué bastante mediano; las lámparas eran defectuosas, y los reflectores, de forma esférica, tan sólo recibian una pequeña fraccion de los rayos de luz, ó no los proyectaban en la direccion conveniente. «En 1782 se estableció esta clase de alumbrado en Cordouan; más, aunque aquel faro tenia nada ménos que veinticuatro lámparas, cada una con su correspondiente reflector, difundian una luz tan escasa que los navegantes solicitaron con instancia que se adoptara de nuevo el sistema bárbaro de la Edad media.» (*Los Faros*, por Leon Rénard.)

Un ingeniero del siglo pasado, Teulére, sustituyó á los espejos esféricos otros de forma parabólica, propuesta ya por Lavoisier. Los espejos de esta clase despiden la luz de una lámpara situada en su foco, á modo de haz cilíndrico formado de rayos paralelos, cuya intensidad no disminuye por consiguiente con la distancia. El espesor de las capas de aire ó de las brumas atmosféricas es lo único que causa alguna atenuacion en esta luz. El mismo inventor reemplazó tambien las lámparas ordinarias por las de doble corriente de aire que Argaut acababa de inventar, y más adelante por las lámparas Cárcel, en las que el aceite va á parar al mechero de un modo continuo merced á un mecanismo de relojería, con lo cual se aumentó el brillo y la constancia de las luces que el aparato reflector proyectaba á larga distancia.

Teulére distribuyó sus veinticuatro espejos en tres círculos superpuestos, é hizo de modo que dieran vueltas alrededor de una lámpara cuyo mechero permanecia en el eje de rotacion, de suerte que la luz llegaba sucesivamente á todos los puntos del horizonte. El objeto de este movimiento de rotacion consistia en repartir la luz con toda la uniformidad posible en todos los azimuts, y no, como se ha dicho, en producir alternativamente ocultaciones y destellos. No es por tanto exacto decir que Teulére ha sido el inventor de los *faros de eclipses*, pues este perfeccionamiento se introdujo por primera vez en Suecia en el faro de Marstrand. Allí, dice L. Fresnel, en vez de apelar al uso de pantallas que ocasionan una pérdida notable de efecto útil, se obtenian fases bien marcadas haciendo girar todos los reverberos. Estos eran tres, colocados horizontalmente en triángulo equilátero alrededor de un eje vertical, de suerte que por efecto de su movimiento uniforme de rotacion, producian en todos los azimuts una serie regular de *destellos* que alternaban con eclipses.» Borda estableció en Dieppe, en 1784, un faro de esta clase, y otro en la torre de Cordouan en 1791.

Los aparatos catóptricos se componen por lo regular de grupos de espejos parabólicos, provisto cada cual de una lámpara en su foco. Un mecanismo de relojería pone en movimiento todo el conjunto, que viene á ser el representado en la figura 221, y el cual comprende tres series de reflectores, agrupados de tres en tres, de suerte que una rotacion completa hace llegar á cada punto del horizonte tres destellos y tres eclipses. Variando la velocidad del movimiento se puede hacer que los eclipses sean más ó ménos frecuentes, y distinguir de este modo entre sí los faros establecidos en diferentes puntos de la costa.

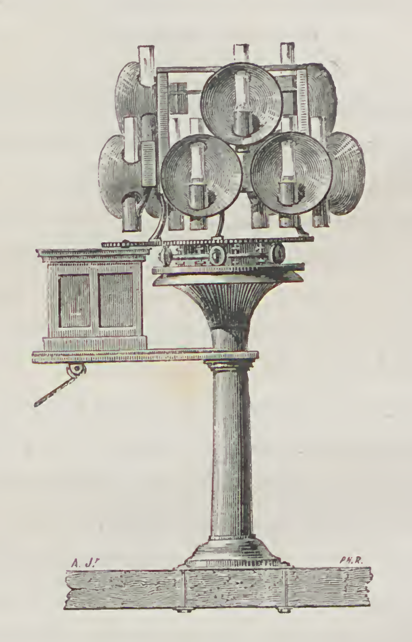


*Fig. 221.*—Faro catóptrico

El alcance de los espejos parabólicos es muy grande. Los experimentos hechos por Biot y Arago prueban que un espejo de 81 centímetros de abertura da una luz que se divisa con un buen anteojo á cuarenta leguas de distancia. Sin embargo, la pérdida de luz por efecto de la reflexion ó por la absorcion de los rayos en la superficie del metal equivale por lo ménos á la mitad de los rayos incidentes. Además, la superficie bruñida de los espejos se deteriora rápidamente por la accion de los vapores salinos

que contiene el aire en la inmediacion del mar. Estos inconvenientes han sido causa de que se abandonen poco á poco los faros catóptricos, ó cuando ménos de que no se aplique ya este sistema á los de primer órden ó de larga duracion: en Francia sólo se los utiliza para alumbrar los pasos estrechos, los canales, ó como suplemento de la luz de otro sistema en una direccion en que el alcance de esta es insuficiente.

Pero no se les hubiera podido desechar á no ser por la invencion de los aparatos lenticulares, en que la reflexion ha sido sustituida total ó parcialmente por la refraccion en la proyeccion de la luz: los faros provistos de estos aparatos llevan el nombre de *faros dióptricos*, invencion que debemos al ilustre Fresnel y que tan sólo data de 1822.

## II

### FAROS DE REFRACCION Ó DIÓPTRICOS.—APARATOS LENTICULARES DE FRESNEL

Más adelante veremos, cuando tratemos de los espejos ustorios, que á Buffon se le habia ocurrido la idea de construir lentes formadas de porciones concéntricas de una misma lente de gran abertura, disminuyendo así el espesor del vidrio, y por consiguiente la cantidad de rayos de calor absorbidos durante su paso al medio refringente; pero á causa de las dificultades con que se tropezaba para fabricar, fundir, tallar y alisar cualquier masa de vidrio algo considerable, no se habian ejecutado en grande escala estas *lentes de escalones*.

Fresnel, que por recomendacion de Arago fué agregado á la comision nombrada en 1819 para perfeccionar los faros, creyó que se podria sustituir ventajosamente á los reflectores parabólicos grandes lentes de vidrio. Y en efecto, por una parte, la imágen luminosa reflejada por el espejo más perfecto apénas da la mitad del brillo directo del cuerpo iluminador; por otra parte, como la casi totalidad del cono de rayos directos tiene por vértice el mechero de la lámpara focal, se pierde su efecto útil en el mar. Fresnel pensó pues en poner un aparato refractor lenticular en vez de los aparatos catóptricos; y para disminuir el espesor central del tambor dióptrico, ocurriósele la misma idea que á Buffon, pero introduciendo en ella dos modificaciones que pueden considerarse capitales. En primer lugar, hizo posible y práctica la construccion de lentes escalonadas de gran abertura, formándolas de muchos pedazos que es fácil labrar separadamente, y uniendo todas las partes de la lente con una masilla de cola de pescado gracias á la cual se las adhiere sólidamente por sus bordes. En segundo lugar, aprovechó este sistema de fabricacion para introducir en la forma misma de las superficies refringentes un perfeccionamiento en el que Buffon no habia pensado. Despues de dejar sentado que si el célebre naturalista no consiguió que le construyeran una lente de escalones de tres piés de diámetro consistió en que no se le ocurrió hacerla de muchos pedazos, Fresnel añade: «A lo que parece, tampoco habia echado de ver una gran ventaja que ofrece la ejecucion separada de cada anillo, cual es la de corregir casi enteramente la aberracion de esfericidad, cuando se han multiplicado los anillos suficientemente, averiguando por el cálculo el centro y el radio de curvatura de cada uno de los arcos generadores. Porque, despues de concebir primeramente la lente terminada por una misma superficie esférica, supone que se deprime esta por escalones, pero de modo que la nuevas porciones de superficies esféricas sean *concéntricas* á la primera, lo cual no es el verdadero modo de corregir la aberracion de esfericidad. El cálculo nos enseña que los arcos generadores de los anillos, no tan sólo no deben tener el mismo centro, sino que los diferentes centros no han de estar situados en el eje de la lente sino que se alejan de él tanto más cuanto más disten á su vez del centro de la lente los arcos á que pertenecen, de suerte que al girar estos alrededor del eje, no engendran porciones de superficies esféricas concéntricas, sino superficies por el estilo de las que los geómetras llaman anulares.»

A fin de utilizar todo lo posible los rayos de luz emanados de la lámpara situada en el foco comun de todas las lentes que componen un aparato dióptrico, Fresnel hizo de modo que fuesen á converger en lentes trapezoidales los rayos superiores que pudieran perderse; estas lentes estaban colocadas al rededor de la lámpara con tal inclinacion que los rayos se reflejaban horizontalmente en *rr* por medio de espejos M M en forma de abanico, é iban á

reforzar los haces R R de las lentes verticales. La figura 222 presenta el plano y la elevacion de un aparato lenticular tal como Fresnel lo construyó en un principio. Despues, en lugar de recoger en lentes inclinadas y en sus espejos reflectores los rayos que no caen sobre las lentes verticales, los hizo llegar á series de coronas de espejos de cristal azogado, convenientemente inclinadas para que la reflexion se efectuara horizontalmente, y tambien á series de prismas en que los rayos luminosos sufren una reflexion total. Las figuras 223 y 224 presentan la marcha de los rayos en uno y otro sistema.

Así pues, la reflexion y la refraccion se utilizan por igual en estos aparatos, que llevan por esta razon el nombre de *faros catadióptricos*. Fresnel no se limitó á hacer estas modificaciones capitales en el alumbrado de los faros, sino que tambien perfeccionó las lámparas con el auxilio de Arago, introduciendo en ellas los sistemas de mecheros múltiples ideados por Rumford, y combinando con ellos oportunamente el sistema Carcel, á fin de dar á la luz toda la intensidad y regularidad posibles, cualidades tan preciosas en asunto de tal naturaleza.

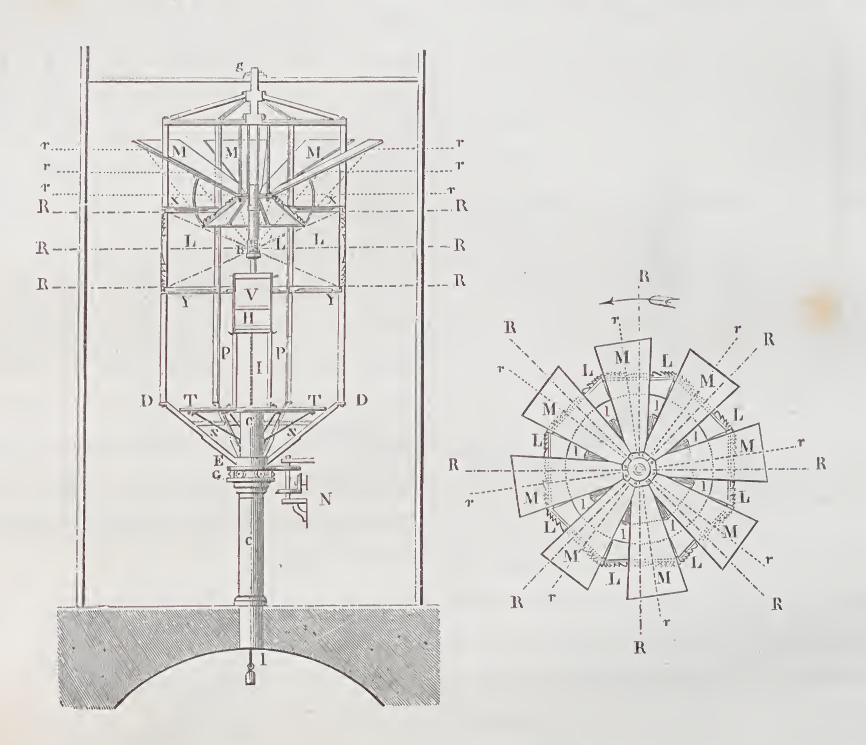


*Fig. 222.*—Primer aparato lenticular de Fresnel. Plano y elevacion

Fresnel proyectaba introducir otras modificaciones en sus aparatos lenticulares, y especialmente en su aplicacion al alumbrado de la entrada de los puertos, pero su salud gravemente quebrantada no le permitió realizarlas todas.

«Apénas habia comenzado la ejecucion de su primer aparato catadióptrico para los faros de puerto, dice su hermano L. Fresnel, cuando los incesantes progresos de la enfermedad orgánica, con la cual venia luchando penosamente hacia algunos años, pusieron fatal término á sus trabajos científicos y administrativos.—¡Cuántas cosas habria podido hacer todavía!—exclamó dando el adios postrero á su excelente amigo Arago, que tan desinteresadamente le habia sostenido y animado en sus principios en la carrera de las ciencias. Esta suprema y dolorosa exclamacion del moribundo debia referirse principalmente á sus investigaciones sobre la teoría de la luz, pues su nuevo sistema de faros podia considerarse como obra ya terminada bajo el punto de vista teórico. Y en efecto, para el desarrollo de tan brillante invento, bastaba sólo perfeccionar los procedimientos de ejecucion y estudiar, bajo el concepto práctico, las variantes que podian introducirse con provecho en las combinaciones de los elementos dióptricos y catadióptricos ideados por Fresnel, combinaciones y estudios que legaba á los continuadores de sus trabajos.»

(Introduccion á las Memorias de A. Fresnel sobre los faros) (1).

Digamos ahora algunas palabras sobre los medios empleados para dar variedad á las luces de los faros y para que los marinos puedan reconocer los puntos de la costa á cuya vista se encuentran.

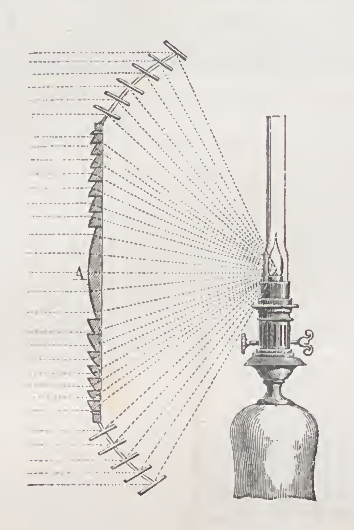



*Fig. 223.*—Marcha de los rayos en un faro lenticular de Fresnel, de lentes y espejos inclinados

Los faros se dividen en faros de primero, de segundo y de tercer órden, segun la intensidad de su brillo y el alcance de su luz. Las lámparas de los faros de primer órden tienen cuatro mechas concéntricas; los de segundo tres y los de tercero dos. El brillo varía en la relacion de los números cuatro, dos y uno, y equivale á veinte, diez y cinco lámparas Carcel. Posteriormente se ha conseguido todavía mejor resultado.

Esto en cuanto á las intensidades. Pero á igualdad de intensidad, se distinguen las luces por el número de los eclipses y la duracion de los intervalos que los separan, y tambien por el color de la luz de los destellos. Hay *luces fijas*, producidas por un aparato lenticular de forma cilíndrica, y luego *luces de eclipses* de destellos blancos, encarnados ó verdes, combinados de diverso modo. El aparato lenticular se compone entónces de un tambor octógono formado principalmente de ocho lentes sencillas de escalones. La rotacion más ó ménos rápida del sistema produce una sucesion de destellos y eclipses de duracion variable. Por último, mediante unos cristales de colores puestos delante de las lentes, se puede variar tambien el color de las luces. Las figuras 230, 231 y 232 muestran cómo están dispuestos los aparatos para algunas de estas combinaciones. En las figuras 238, 239 y 240 se puede ver tambien cómo están instalados estos aparatos en la linterna que corona la torre del faro, así como la estructura arquitectónica del edificio. El faro de Cordouan tiene, como se ve, un aspecto monumental y es enteramente de piedra. El de Nueva Caledonia, recien instalado, es, por el contrario, de palastro y de hierro fundido: construido en Paris, se le ha podido trasportar ya fabricado al punto de su destino, donde se ha inaugurado hace unos doce años.

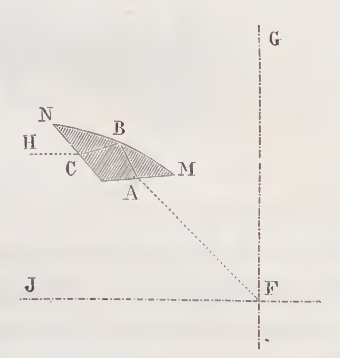



*Fig. 224.*—Reflexion total en los prismas de los faros catadióptricos

En estos últimos tiempos, se ha introducido en el alumbrado de los faros otra innovacion, que consiste en haber sustituido la luz de una lámpara ordinaria por la eléctrica, aumentando así la intensidad y alcance de las luces de los faros. Pero como el aparato dióptrico continúa siendo el mismo, no necesitamos ocuparnos aquí de este nuevo sistema, del cual trataremos más extensamente en el libro consagrado á las aplicaciones de la electricidad, describiendo entónces el modo de alumbrado, la naturaleza de la luz y las máquinas que la producen.

(1) Citemos tambien las palabras de E. Verdet, digno apreciador del genio de Fresnel. «Jamás se agradecerá lo bastante el servicio que el inventor de los faros lenticulares ha prestado á su país y á todo el mundo civilizado. Y precisamente por estos mismos servicios, no puede ménos de apenarnos una consideracion. Otros ingenieros habrian ideado temprano ó tarde las lentes escalonadas, las lámparas de mechas concéntricas, los faros de eclipses, etc.; pero Fresnel era el único que podia continuar la revolucion que habia iniciado en la ciencia. ¿Quién sabe lo que hubiera hecho si hubiese podido proseguir sin interrupcion y exento de todo cuidado, el desarrollo de sus fecundas ideas?» *(Introduccion á las obras de A. Fresnel.)*

# CAPITULO III

## EL MICROSCOPIO

### I

### LA LENTE

Un objeto sumamente pequeño envia al ojo, hallándose por supuesto situado á la distancia de la vision distinta y áun cuando esté fuertemente alumbrado, un haz de luz que es muy poco intensa para que su impresion en la retina produzca una imágen clara y determinada. Para esto seria menester acercarlo á los ojos, aumentando así su diámetro aparente; pero entónces los rayos emanados de sus diferentes puntos no se reunirian en la retina y la imágen seria confusa.

El *microscopio* es un instrumento destinado á servir de auxiliar á la vista produciendo imágenes más ó ménos ampliadas de los objetos pequeños, que nuestros ojos pueden ver entónces claramente como á la distancia de la vision distinta.

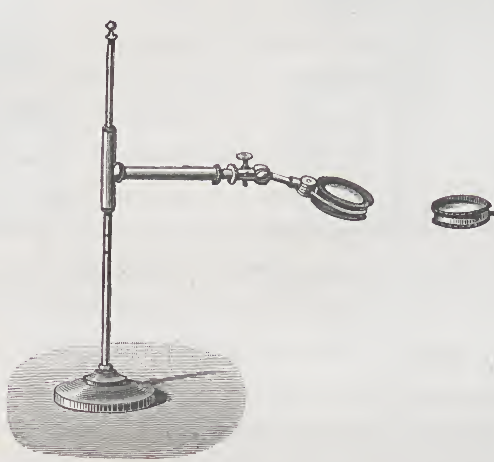


*Fig. 225.*—Porta-lente

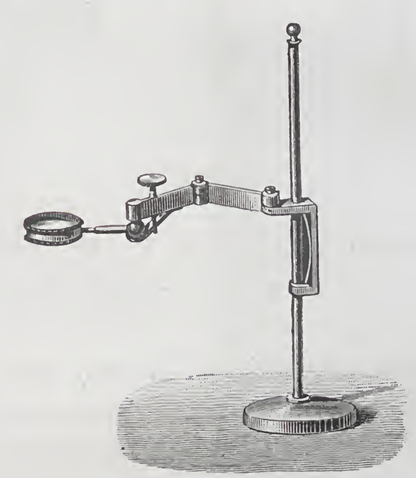


*Fig. 226.*—Otro modelo de porta-lente

Hay dos clases de *microscopios:* la *lente de aumento* ó *microscopio simple* y el *microscopio compuesto.*

Es muy probable, cuando no absolutamente probado, que los antiguos conocian el poder amplificador de las masas de vidrio de forma esférica. De un pasaje de una comedia de Aristófanes se deduce que los atenienses no ignoraban el modo de encender fuego con un pedazo de vidrio que concentraba en su foco los rayos del Sol. Las piedras preciosas grabadas que se conservan del tiempo de los romanos debieron forzosamente de labrarse con el auxilio de instrumentos de aumento, los cuales consistian en pedazos de vidrio tallados ó fabricados en forma de lentes, ó tal vez en bolas huecas de cristal

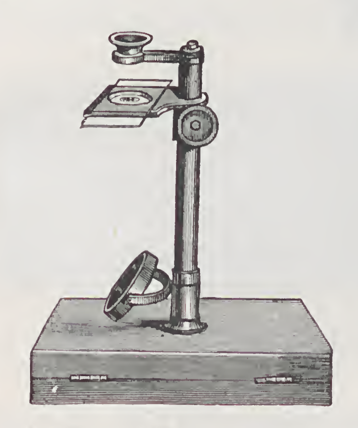


*Fig. 227.*—Microscopio simple

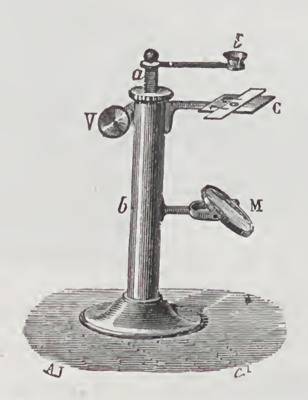




*Fig. 228.*—Otro microscopio simple

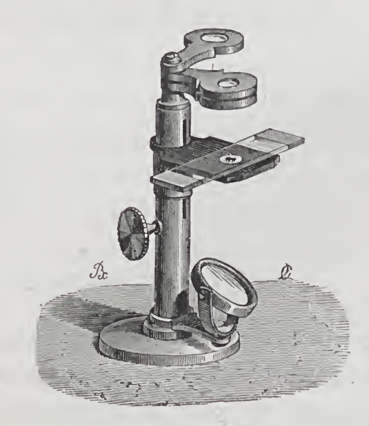


*Fig. 229.*—Anteojo compuesto

llenas de agua. Esta última suposicion es la más probable á juzgar por un párrafo de las *Cuestiones naturales* de Séneca que dice así: «Todos los objetos vistos al través del agua parecen más grandes. Los caracteres diminutos y poco distintos, leidos al través de un globo de vidrio lleno de água, parecen mayores y más claros.» Pero si los antiguos conocieron el poder óptico de las esferas de agua ó de cristal, y áun de las lentes de vidrio, no supieron sacar partido de ellas ni construirlas con precision. No hay una observacion de historia natural de cuantas nos dejaron que atestigüe que en la antigüedad se hizo algun uso científico de la lente de aumento.

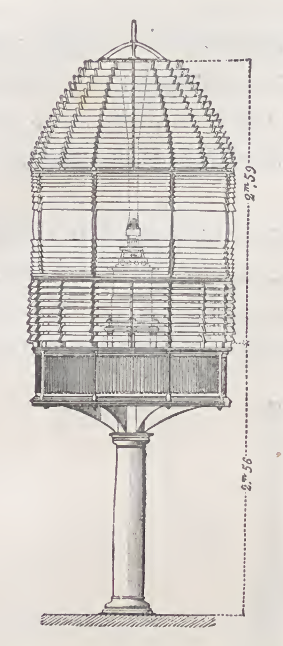



*Fig. 230.*—Aparato de primer órden de luz fija y blanca

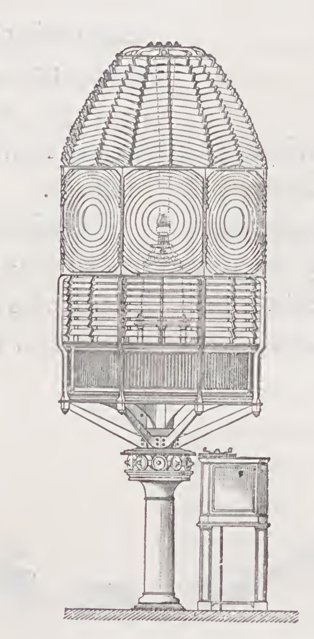


*Fig. 231.*—Aparato de primer órden de eclipses de minuto en minuto

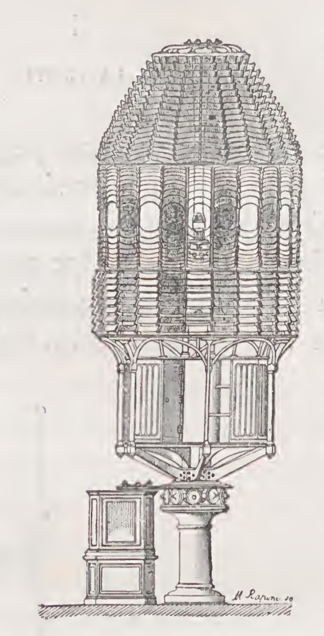


*Fig. 232.*—Aparato de luces blancas y rojas de eclipses de 20 en 20 segundos

El microscopio, reducido á su mayor sencillez, consiste en una simple lente convergente, plano-convexa ó bi-convexa, metida en una armadura cuya forma varía con el destino que se da al instrumento: es lo que vulgarmente se llama *cristal* ó *anteojo de aumento.*

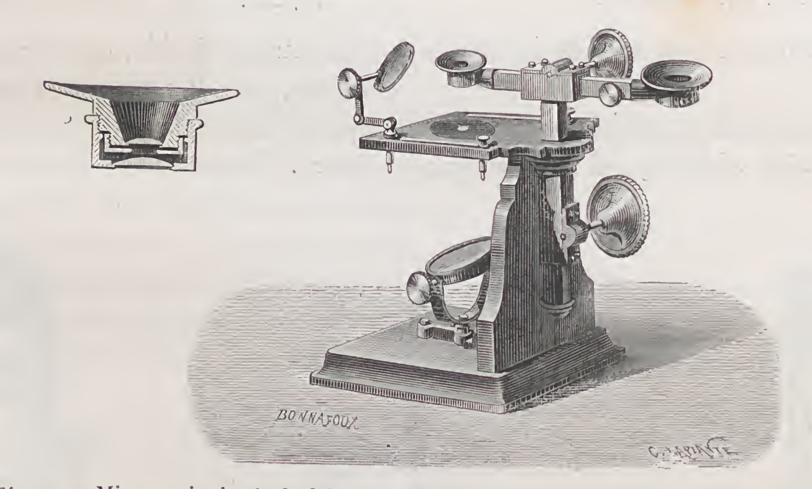



*Fig. 233.*—Microscopio simple de doblete. Doblete de Wollaston, modificado por Chevalier

La figura 234 representa la marcha de los rayos luminosos en una lente; el objeto A B está situado á una distancia de la lente menor que la distancia focal principal. El ojo O*f*, situado en el punto F de convergencia, recibe estos rayos como si emanaran de los puntos A′ B′, es decir, de una imágen virtual recta y agrandada del objeto.

Para que esta imágen sea bien clara, es menester que la distancia A′ F sea igual á la de la vision distinta para el observador, de donde resulta, para la posicion del objeto, un punto determinado que se puede calcular ó deducir fácilmente por tanteo ó por experiencia. Esta

posicion difiere muy poco de la del foco principal *f*, y tanto ménos cuanto más curvatura tenga la lente, es decir, cuanto más corto sea

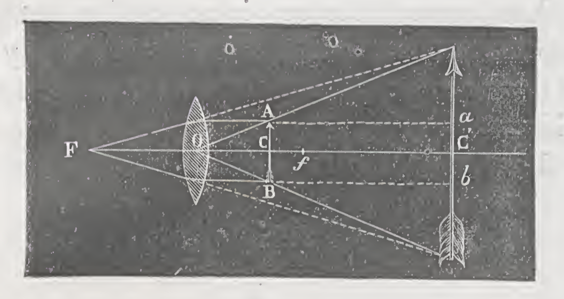



*Fig. 234.*—Marcha de los rayos luminosos en la lente Aumento

su foco. Si se coloca el objeto á mayor distancia del anteojo, llega en breve al foco principal *f*, y la imágen, que ha disminuido de amplitud, puede llegar al infinito. Si por el contrario, se acerca el objeto á la lente, su imágen se agranda, pero es tambien más confusa.

¿Cómo se mide el aumento de una lente?

En los instrumentos de óptica y supuesta la nitidez de la imágen, el aumento no es otra cosa sino la relacion que hay entre los respectivos diámetros aparentes del objeto y de la imágen. Entiéndese por esto el valor de los dos ángulos bajo los cuales ve el ojo, ya uno, ya otro de dichos diámetros, suponiéndolos situados á igual distancia de la vision distinta. Por lo que se refiere al anteojo de aumento, como puede despreciarse la distancia del ojo á la lente, el aumento es igual á la relacion de los ángulos A'OB', y *a* O *b*, ó tambien al de las dimensiones A' B', A B, la cual es igual á la relacion de las distancias O C' y O C. Siendo la primera de estas distancias la de la vision distinta,

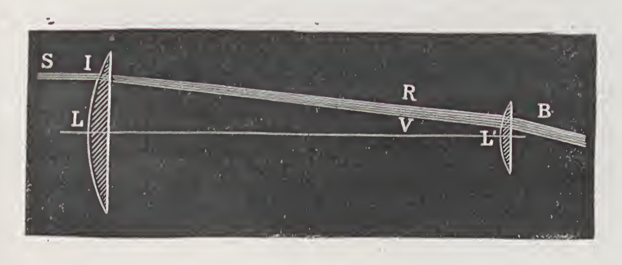



*Fig. 235.*—Ocular acromático de Campani

el aumento no depende ya, como se ve, sino de la distancia O C' del objeto á la lente, es decir, de la distancia focal principal, que difiere muy poco de aquella.

Así pues, cuanto mayor sea la curvatura de una lente ó más corto su foco, y aparte de esto, cuanto más larga sea la vision distinta del observador, más grande será el aumento.

La lente representada en perspectiva y en su seccion vertical en la figura 241, 1 y 2, es la que suelen usar los relojeros y grabadores. Se la sostiene en la mano, y tambien se la sujeta delante del ojo comprimiendo al efecto los músculos de las cejas y de la mejilla, quedando así las manos libres, pero es preferible adaptarla á un pié ó *porta-lente* (fig. 225).

El aumento de estas lentes apénas pasa de 5 diámetros; además, adolecen de un defecto bastante grave, el de tener una gran *aberracion de esfericidad*. Dase este nombre á un fenómeno que se comprueba de un modo muy sen-

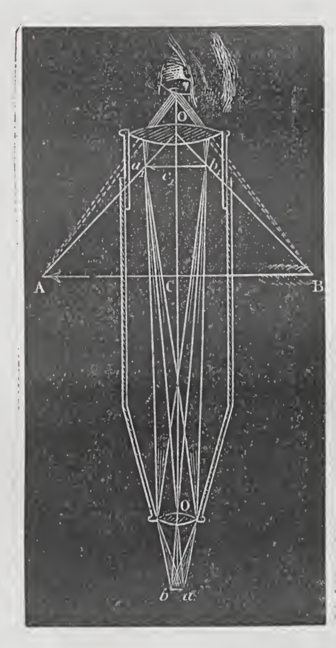



*Fig. 236.*—Marcha de los rayos luminosos en el microscopio compuesto

cillo: Mírese un objeto de cierto tamaño con uno de estos anteojos y se observará que la imágen no se ve con limpieza sino en su parte central solamente; en los bordes aparece deformada y difusa, además irisada, lo cual consiste en otro defecto, en la falta de *acromatismo*. Pero tiene una ventaja que compensa en parte estos defectos, la de ser su campo muy dilatado; su gran distancia focal permite tambien que se muevan las manos y los objetos debajo de ella y que se efectúe sin molestia cualquier trabajo.

*Fig. 237.*—Objetivo acromático

Se disminuye la aberracion de esfericidad aplicando á los bordes de la lente un diafragma ó placa anular opaca que detiene

los rayos de esta parte de la lente; en cambio, el campo resulta con ello más reducido.

Para evitar á la vez la aberracion de esfericidad y el acromatismo, se compone el anteojo de aumento de dos lentes plano-convexas con sus convexidades contiguas ó de dos lentes acromáticas, cada una de ellas formada, como se verá más adelante, de dos cristales convenientemente escogidos. Se puede calcular las curvaturas de modo que desaparezca la aberracion de esfericidad.

Los naturalistas se sirven de los anteojos representados en la figura 241, 11, 12, 14 y 15; la misma montura contiene dos ó tres aumentos diferentes.

El anteojo *periscópico* de Wollaston y el de Brewster ó de Coddington tienen el diafragma situado en el interior, en la masa del cristal; pero el último es un sector cilíndrico sacado de una esfera, y la parte media del cilindro está tallada á modo de garganta para formar diafragma. Con este anteojo se pueden obtener aumentos de 30 diámetros.

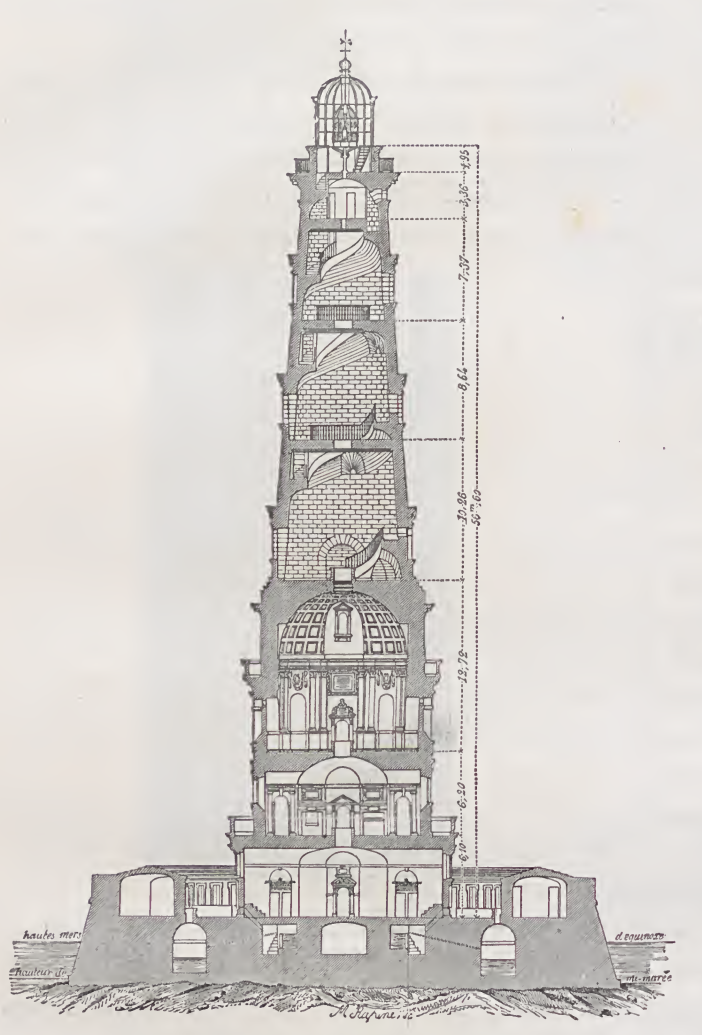



*Fig. 238.*—Interior del faro de Cordouan

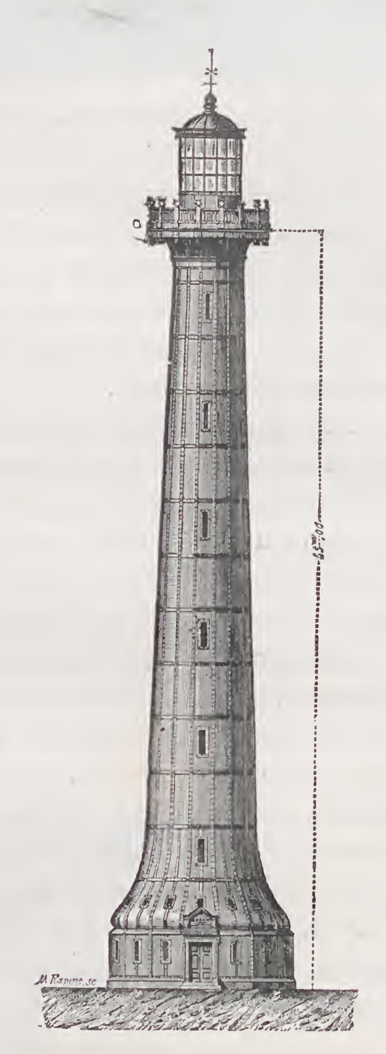


*Fig. 239.*—El faro de Nueva-Caledonia

El anteojo Stanhope consiste tambien en un cilindro de cristal, pero la convexidad de sus superficies no es igual. Aplicando á la más plana los pequeños objetos trasparentes que se desea estudiar, como polvillos de polen, plúmulas de las alas de mariposa, etc., y mirando por la otra cara al trasluz, se ve la imágen alumbrada y ampliada del objeto con un aumento que puede llegar á 40 diámetros.

## II

### EL MICROSCOPIO SIMPLE.—DOBLETE DE WOLLASTON

El *microscopio simple* (inventado por Cuff y llamado tambien *microscopio de Raspail)* es un anteojo montado en un pié ó soporte de cobre, el cual sostiene á su vez una placa ó *porta-objeto* sobre el cual se coloca el objeto que se quiere estudiar, y más abajo un espejo plano ó cón-

cavo, que sirve para proyectar la luz difusa del dia sobre el mismo objeto. Mediante un tornillo de boton y una barra dentada se puede subir ó bajar el anteojo ó el porta-objeto hasta encontrar la posicion en que con más nitidez aparece la imágen, posicion que varía segun los individuos ó segun los aumentos que se emplean. La placa tiene un orificio que da paso á la luz reflejada por el espejo, y el objeto se coloca sobre una lámina de vidrio encima de la abertura.

Fabrícanse asimismo microscopios simples más complicados, en los cuales hay dos lentes á las que se pueden dar direcciones más ó ménos inclinadas, haciendo así posible el exámen del objeto en todas sus caras.

En lugar de un anteojo simple se suele adaptar al microscopio otro formado de dos cristales separados por un diafragma con objeto de destruir la aberracion de esfericidad y de tener un anteojo acromático; tal es el *doblete de Wollaston*: en la fig. 233 están representados un microscopio simple de doblete y la seccion vertical de un doblete perfeccionado por C. Chevalier. El anteojo compuesto llena el mismo objeto (fig. 229): se compone de anteojos de lentes biconvexas, de aumentos y campos diferentes, que se pueden sobreponer como se quiera.

El anteojo de aumento y el microscopio simple han prestado grandes servicios á las ciencias: del segundo se hace uso sobre todo para la preparacion y diseccion de objetos, en especial para la anatomía vegetal, pues los histiólogos le prefieren al microscopio compuesto para disecar tejidos animales. En este caso raro es que los aumentos excedan de 60 diámetros, porque, con ampliaciones mayores, el foco de la lente es tan corto que apénas queda sitio debajo para la manipulacion. Para observaciones más sencillas se pueden emplear dobletes que aumentan hasta 500 diámetros; pero en este caso el foco de la lente sólo es de 45 cienmilímetros, ni siquiera medio milímetro.

## III

### EL MICROSCOPIO COMPUESTO

En el microscopio compuesto hay dos sistemas de lentes: una llamada *ocular*, porque se coloca junto al ojo; otra, *objetivo*, porque se pone en direccion del objeto cuya imágen ampliada se desea obtener.

El objetivo es una lente *biconvexa* que da una imágen real y agrandada ya del objeto, pero invertida. Esta imágen es la que se examina con el ocular, el cual desempeña por tanto las veces de un anteojo, sólo que este anteojo sirve para ver y agrandar, no el objeto, sino la imágen.

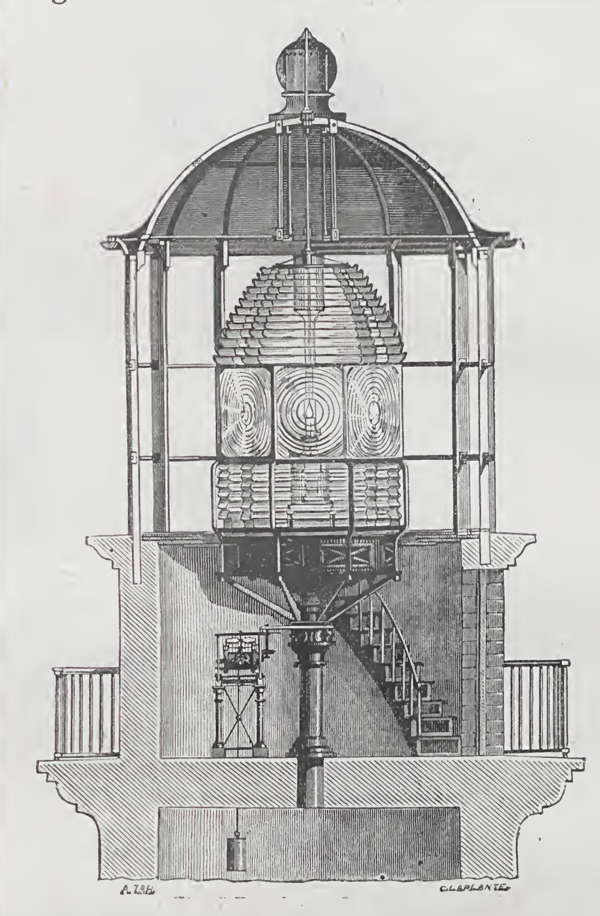


*Fig. 240.*—Aparato lenticular y linterna de un faro de primer órden

En la figura 236 se ve trazada la marcha de los rayos luminosos en el microscopio compuesto. O′ es el ocular y O el objetivo delante del cual se ve el pequeño objeto *ba*. El objetivo produce en $a_1$ $b_1$, que es el foco del anteojo ocular, una imágen agrandada que sirve á su vez de objeto: esta imágen aparece al revés, y como el ocular no hace más que ampliarla sin devolverle su posicion verdadera, el ojo ve tambien el objeto al revés, como si estuviese en AB, es decir, en el límite inferior de la vision distinta.

Tal es el aparato óptico del microscopio compuesto reducido á su más sencilla expresion; pero, lo propio que en el anteojo de aumento, hay que corregir algunos defectos, ya del obje-

tivo ó bien del ocular, por lo que respecta á la aberracion de esfericidad y á la de refrangibilidad.

Se remedia el primer defecto limitando la extension de la imágen real por medio de un diafragma situado en el foco del ocular, es decir, en $a_1$ $b_1$. Mas como de este modo se limita el campo del microscopio, se emplea un ocular de gran diámetro, que tiene por consiguiente un campo más extenso. Con el mismo objeto se hace uso tambien de un sistema de lentes plano-convexas con la convexidad opuesta al ojo.

Tal es el ocular de Campani, que tiene al mismo tiempo la propiedad de destruir la irisacion de las imágenes y de corregir el defecto de acromatismo del objetivo. Véase cómo se consigue este objeto.

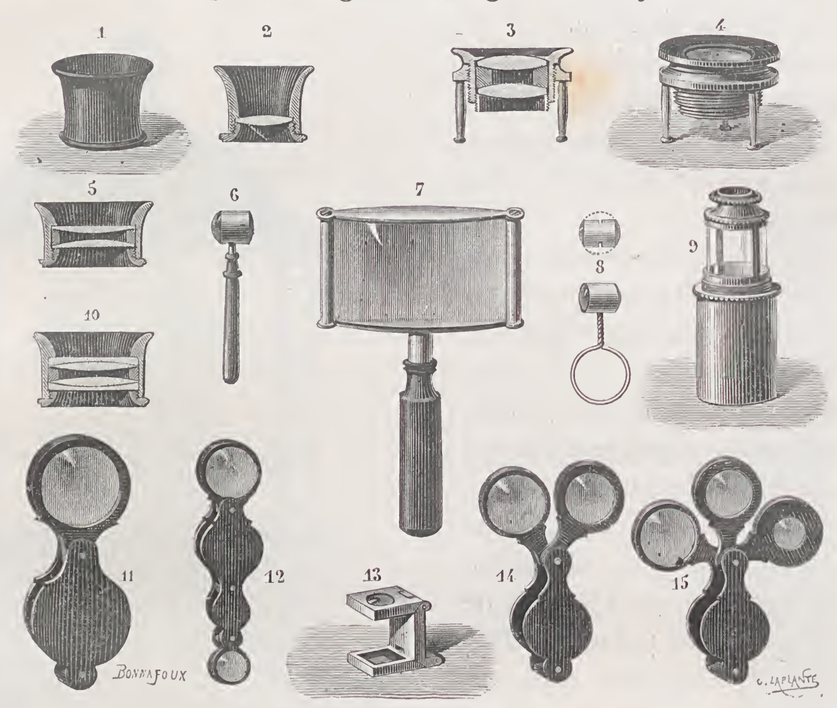



*Fig. 241.*—Lentes de varias clases : 1, 2, lente de relojeros y grabadores; 3, 4, 5, lentes acromáticas; 6, lente de Stanhope; 7, lente de superficie cilíndrica; 8, lente rodada de Brewster, llamada de Coddington; 9, lente ó microscopio de grano; 13, cuenta-hilos; 11, 12 14 y 15, lentes de uno, dos y tres cristales, de los naturalistas

SI es un haz luminoso emanado de los bordes del objeto; al refractarse se divide en rayos de colores, de los cuales los rojos siguen la direccion IR, y los morados la IV, de suerte que el ojo veria el borde del objeto irisado si el segundo ocular L′ no hiciera que los rayos de colores fuesen paralelos en B, donde forman luz blanca. Allí es donde se aplica el ojo para observar.

Se obtiene tambien el acromatismo componiendo el objetivo de dos lentes, una B de flint-glass y la otra A de crown-glass, la primera divergente y la segunda biconvexa (figura 237).

El aumento que da el microscopio compuesto es una combinacion del del objetivo multiplicado por el del ocular. Supongamos agrandada veinte veces la imágen que da el primer sistema; si el ocular la agranda otras cinco, claro está que el aumento total será de 100 veces.

Se sobrentiende que en todo lo expuesto sólo se ha tratado del aumento lineal ó *en diámetro*. El aumento superficial es igual sin duda alguna al cuadrado del número que representa el primero. Así por ejemplo, para una amplificacion en diámetro de 50, 100, ó 500, la superficie del objeto resultará amplificada 2500, 10,000, 250,000 veces.

Segun A. Chevalier, se construyen hoy microscopios compuestos cuyos sistemas ópticos se dividen en nueve series, segun el aumento, desde el n.° 1, que da un poder amplificador de 25 á 50 diámetros, hasta el n.° 9 que aumenta de 600 á 1300 veces. Con esta última amplificacion, las superficies resultan multiplicadas por la enorme cifra 1.690,000, siendo por consiguiente fácil percibir partes de la materia de ménos de un milésimo de milímetro de extension (1).

(1) A causa de las necesidades siempre crecientes de los micrógrafos y de la habilidad práctica de los ópticos, hace unos veinte años que

Pero hay que tener muy en cuenta que el arte de observar con el microscopio no se adquiere sino despues de larga práctica; hay que educar la vista para aprovechar los mayores aumentos, y los principiantes que desean adquirir la habilidad de los maestros harán bien en dar principio á sus observaciones con amplificaciones peque-

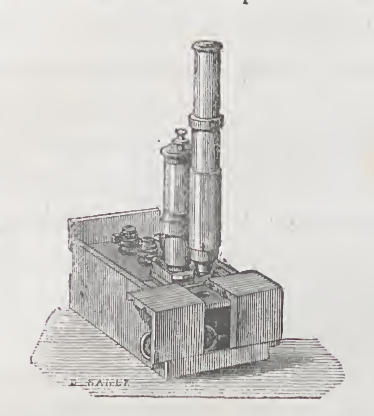


*Fig. 242.*—Microscopio compuesto, con su caja

ñas, aumentándolas gradualmente. Tambien haremos observar que cuanto mayor es la amplificacion y más se divide y difunde la luz que cae sobre el objeto y le hace visible, más necesario es iluminarlo bien.

Describamos ahora algunas de las disposiciones adoptadas por los constructores en los microscopios compuestos.

Lo propio que en el microscopio simple, en el compuesto se distinguen tres partes principales: el aparato *óptico* que contiene el ocular y el objetivo, contenidos en un mismo tubo; el *porta-objeto*, que suele ser de varias formas, pero que las más de las veces consiste en una platina con una ó muchas aberturas circulares sobre las cuales se coloca el cristal que sustenta el objeto; y por fin el *espejo* ó reflector que refleja la luz sobre el cristal y el objeto mismo. Si éste no es trasparente, se le ilumina por encima por medio de una lente situada á un lado y que puede moverse en todos sentidos.

El tubo óptico es vertical unas veces (figura 242 y 245), otras susceptible de inclinarse oblicuamente (fig. 243), y por fin, otras, como en el microscopio de Amici (fig. 244), está acodado en ángulo recto, conteniendo la parte horizontal el ocular, y la vertical el objetivo; un espejo inclinado 45° ó un prisma, situado en su punto de encuentro, refleja los rayos luminosos salidos del objetivo y los envia horizontalmente al ocular.

Para obtener imágenes que produzcan la sensacion del relieve, el cual no se nota cuando se observa con un solo ojo, ha construido M. Na-

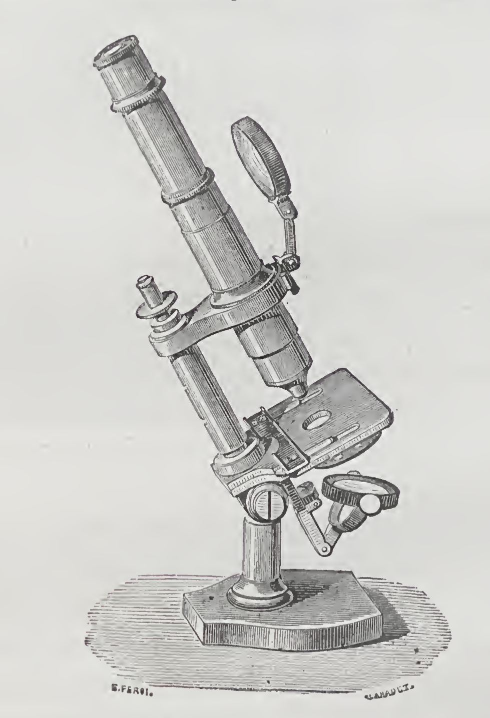


*Fig. 243.*—Microscopio inclinado de Nachet

chet microscopios compuestos de doble aparato óptico, dándoles el nombre de *microscopio biocular*. Cuando estudiemos la vision estereoscópica, se comprenderá la necesidad de esta disposicion, que preserva al observador de ilusiones falaces, las cuales proceden del modo cómo están iluminados los detalles de los objetos que con frecuencia estudia por vez primera y cuya estructura real le es desconocida.

El mismo fabricante construye microscopios de tres cuerpos, gracias á los cuales pueden

se construyen objetivos acromáticos que dan aumentos mucho mayores que los que acabamos de citar. Hé aquí lo que dice acerca de este asunto el doctor J. Pelletan, que ha publicado una obra muy apreciada titulada *El Microscopio y sus usos:* «Se ha echado de ver que combinando muchos sistemas de lentes con arreglo á varias fórmulas, se podia agrandar considerablemente el ángulo del cono luminoso que penetra en el objetivo. Pero esto no era posible sino con una distancia focal sumamente corta. En cambio, se obtenian con estos objetivos de gran abertura imágenes mucho más perfectas que con los antiguos objetivos de ángulos pequeños. Viendo los ópticos que se podian utilizar estos objetivos á muy poca distancia, se aprovecharon de ello para reducir todavía más el radio de sus lentes, disminuir por lo tanto el foco y aumentar la amplificacion, y de este modo han llegado á conseguir aumentos formidables. Pero no debe olvidarse que las cifras marcadas en los catálogos son á menudo de puro capricho.» El doctor Pelletan cita un microscopio construido por el óptico americano Tolles, cuyo aumento *parece ser de 15,000 diámetros* con un objetivo de 1/75 de pulgada y un ocular de media pulgada á 25 centímetros de distancia. Pero añade: «Digo *parece ser* porque no creo que se pueda utilizar *prácticamente* este objetivo con semejante ocular, pues como se comprenderá es de muy difícil manejo; y sólo se puede hacer uso de él en el fondo de un sótano para evitar las vibraciones.»

observar simultáneamente tres personas. Estos instrumentos son preciosos para la enseñanza de la micrografía. En los microscopios de dos ó tres cuerpos no hay más que un objetivo, pero debajo tienen un prisma isósceles de aristas horizontales, que recibe los rayos emanados del objeto, y despues de su reflexion total los hace salir en dos ó tres direcciones diferentes (en este último caso reemplaza una pirámide al prisma), cuyas direcciones son las de los porta-oculares. Dos ó tres observadores pueden estudiar así á la vez el mismo objeto y comunicarse sus observaciones.

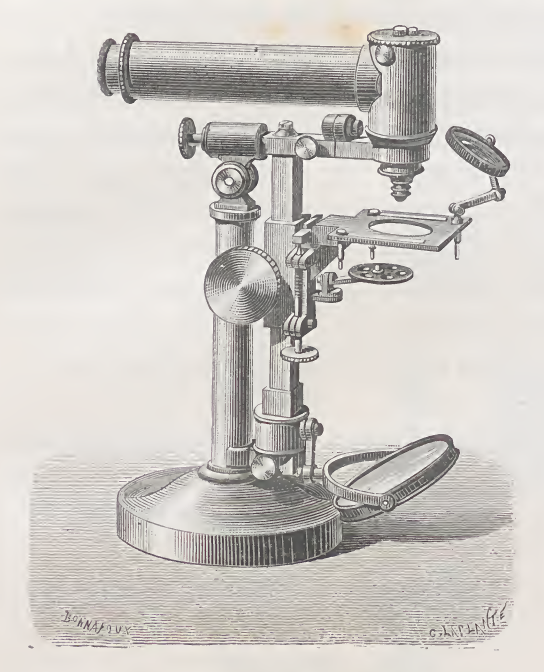


*Fig. 244.*—Microscopio horizontal de Amici

Por último, tambien se hacen microscopios especiales para los químicos (fig. 248). El porta-ocular está en ellos inclinado y va á parar debajo del objetivo, situado á su vez debajo del porta-objeto. Un prisma envia al ojo los rayos luminosos por efecto del fenómeno de la reflexion total.

## IV

### EL MICROSCOPIO SOLAR

Terminaremos la descripcion del microscopio, dando la de un aparato que tiene por objeto proyectar á alguna distancia sobre una pantalla las imágenes agrandadas, de modo que las vea á la vez un gran número de espectadores. Tal es el *microscopio solar*, llamado así porque la luz con que se ilumina el objeto es la luz directa de los rayos del Sol.

El microscopio solar proyecta, como acabamos de decir, en una pantalla la imágen considerablemente aumentada de un objeto muy pequeño. Es un megascopio, cuya disposicion particular permite observar y hacer ver á muchas personas la imágen de que hablamos. A este efecto, se coloca el objeto un poco más allá del foco principal de una lente de foco corto. Segun lo que hemos visto, el aumento será tanto mayor cuanto ménos diste el objeto del foco; pero entónces se formará la imágen á una distancia proporcional de la lente; y á la par que crezca el aumento, más diseminada y por consiguiente más debilitada estará la luz; de aquí la necesidad de alumbrar mucho el objeto, para que la imágen conserve suficiente brillo. Por esto se recibe sobre un cristal convenientemente inclinado, ora los rayos del Sol, ó bien los de un foco muy intenso, como la luz eléctrica. El cristal los refleja y los envia á una lente de gran abertura que los hace converger una vez. Otra lente los concentra en su foco, y en este último punto se halla situado el objeto cuyos detalles de estructura se quiere estudiar. Las figuras 249 y 250 presentan el conjunto del microscopio solar y su construccion interna.



*Fig. 245.*—Modo de observar con el microscopio compuesto

Llámase microscopio de gas aquel en que el objeto está alumbrado por la luz Drummond; y

microscopio foto-eléctrico el que en vez de estar iluminado por los rayos solares recibe la vivísima luz de un arco voltaico.

Cuando el Sol no brilla, no se podrian hacer ciertas demostraciones en las cátedras de física si no se pudiera disponer de un foco de luz casi tan vivo como el Sol; nos referimos á la luz eléctrica, utilizada en el microscopio que representa la fig. 251.

No hay nada tan curioso como ver las imágenes extraordinariamente agrandadas de los detalles orgánicos de los animales más ínfimos, de los infusorios que se mueven en una gota de cola ó de cualquier otro líquido en fermentacion, la descomposicion espontánea del agua en glóbulos gaseosos de oxígeno é hidrógeno, la cristalizacion de las sales, la estructura de los tejidos animales y vegetales, etc.

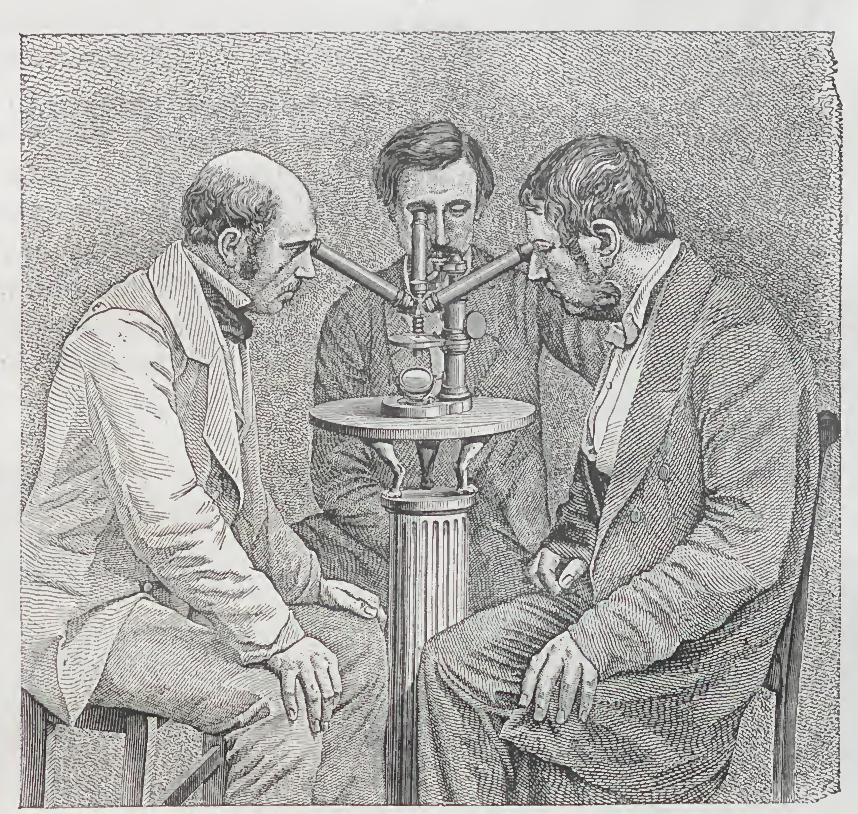


*Fig. 246.*—Microscopio de tres cuerpos para las observaciones simultáneas

La microscopia tiene otra aplicacion importante que no debemos pasar en silencio; tal es la de que, merced á ella, se pueden fotografiar con toda precision los curiosos detalles de las imágenes de los objetos observados por los micrógrafos, haciendo así perdurables ciertas observaciones quizás fugaces. Más adelante dedicaremos un párrafo especial á la *fotomicrografía*, con cuyo nombre se designa hoy esta doble aplicacion de las leyes de la luz.

Por último, añadiremos que para estudiar ciertos cuerpos con el microscopio se emplea la luz polarizada. El uso de esta luz tiene por objeto poner en evidencia algunas propiedades particulares de los cuerpos sometidos al exámen de dicho instrumento. Para trasformar un microscopio comun en otro polarizante, se pone debajo de la platina un pequeño prisma de Nicol que es el *polarizador;* otros ponen un monton de cristales que producen el mismo efecto. Encima del ocular ó debajo de la primera lente se coloca otro prisma de Nicol más fuerte que el primero; este prisma sirve de *analizador*. Haciéndole girar sobre sí mismo, se producen en los objetos examinados, ya sean cristales de uno ó dos ejes, ó ya otras sustancias birefringentes, notables efectos de coloracion, que permiten distinguir con suma claridad todos los detalles de estas sustancias, miéntras que con la luz reflejada ordinaria se distinguen difícilmente.

## V

### CÁMARA OSCURA.—MEGASCOPIO.—LINTERNA MÁGICA

Antes de describir el telescopio, que servirá de asunto para el capítulo siguiente, nos ocuparemos de ciertos aparatos que ofrecen interés

por lo curiosos, por cuya razon no deja nunca de mencionárselos en las obras de física recreativa, siquiera presten á veces verdaderos servicios á la ciencia: en este número figuran la *cámara oscura*, la *cámara clara* ó *lúcida*, el *megascopio*, la *linterna mágica* y el *fantascopio*.

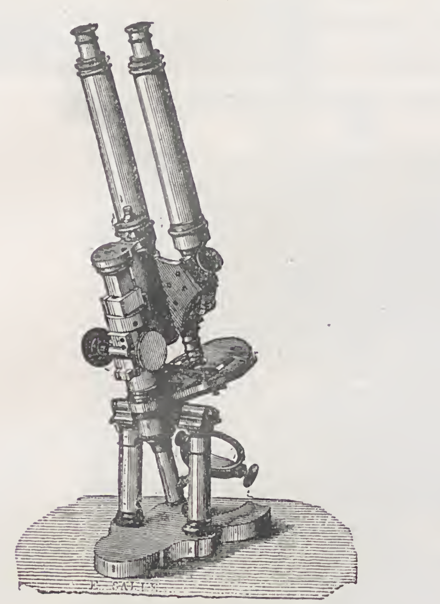


*Fig. 247.*—Microscopio bi-ocular

Al hablar de la propagacion rectilínea de la luz dijimos que si se hace un agujerito en la madera de una ventana herméticamente cerrada, se forma la imágen de los objetos exteriores en una pantalla colocada dentro de la habitacion. Esta imágen invertida no aparece clara y bien definida sino cuando reproduce los objetos distantes.

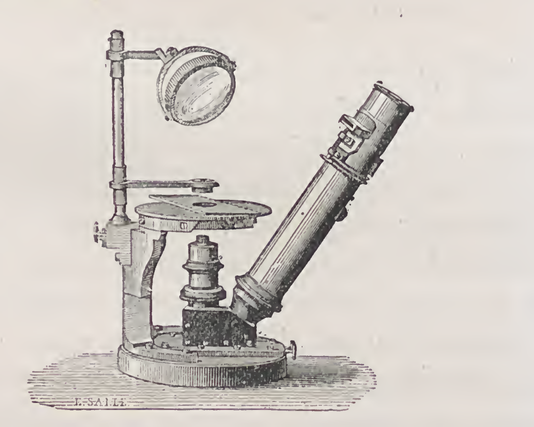


*Fig. 248.*—Microscopio de los químicos

Para remediar este inconveniente y dar más brillo á las imágenes, discurrió Porta, físico del siglo XVII, recibir la luz en un espejo esférico cóncavo que reflejaba los rayos y la imágen en una pantalla; pero consiguió resultados más sorprendentes adaptando al agujero de la ventana una lente convergente. La imágen de los objetos exteriores se pintó entónces con nitidez en la pantalla cuya distancia al agujero de la ventana depende de aquella á que se encuentren los objetos, distancia fácil de determinar por medio de tanteos.

Los dibujantes se valen de la cámara oscura así perfeccionada para trazar en un papel los contornos del paisaje que quieren reproducir. En vez de una lente, se emplea un prisma (fig. 252) cuya cara vuelta hácia los objetos es convexa y que por la reflexion total sobre su cara plana, inclinada 45°, envia los rayos luminosos á la mesa en que está el papel para dibujar. La imágen se forma en éste con toda claridad, y el dibujante no tiene que hacer más sino seguir sus contornos con el lápiz. El óptico C. Chevalier fué quien introdujo esta modificacion en la cámara oscura.

Dáse el nombre de *cámara clara* ó *lúcida* á un instrumento que proyecta en el papel la

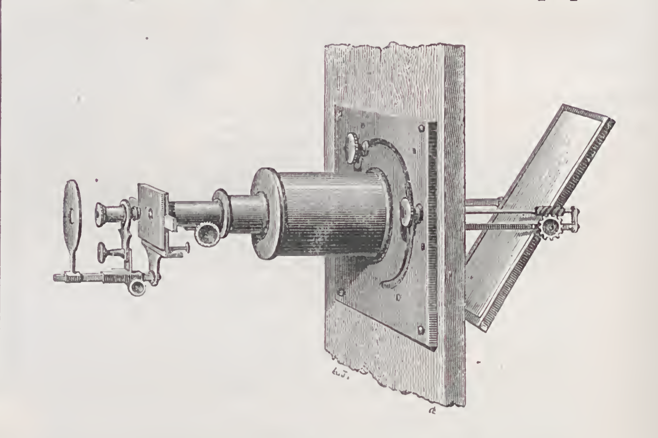


*Fig. 249.*—Microscopio solar

imágen de un objeto, de un paisaje por ejemplo. Vemos por esto que la cámara clara tiene los mismos usos que la oscura, por cuya única razon se le da casi igual nombre. Y en efecto, aquella se compone simplemente de un prisma refringente de forma cuadrangular, cuyo principio es el de la reflexion total de los rayos luminosos en su interior.

El ángulo *b* de las caras *a b* y *b c* es recto; el *a* y el *c* de 67°30' y el *d* de 135° (fig. 253). Así, pues, si un rayo luminoso *n* atraviesa la cara vertical del prisma, y cae en *r* sobre la cara *d c*, su incidencia con la normal á esta última será de 67°50', es decir, mucho mayor que el *ángulo límite;* el rayo se reflejará pues totalmente, caerá en seguida sobre *a d* donde se reflejará del mismo modo, y por fin sobre la

cara superior horizontal, la cual atravesará en sentido perpendicular.

El ojo del observador situado en *p p*, á corta distancia del ángulo del prisma, recibirá así todos los rayos luminosos emanados de los objetos, y verá la imágen de estos proyectada verticalmente. Poniendo un papel debajo del prisma le será fácil al observador ver á la vez en el papel la imágen virtual de los objetos exteriores y la punta de su lápiz con el cual podrá seguir todos los contornos de estos.

La figura 254 representa la cámara clara puesta sobre un pié, mediante el cual se la puede fijar al borde del tablero que dibujante se coloca sobre las rodillas: en la arista D D se ve una muesca, gracias á la cual se puede aplicar el ojo á la arista misma.

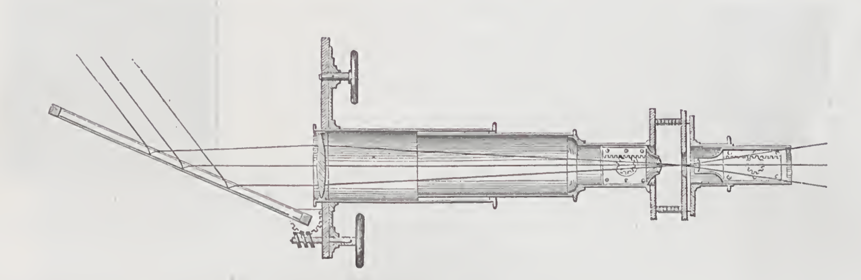


*Fig. 250.*—Seccion horizontal del microscopio solar

El *megascopio* es una cámara oscura ideada con el objeto de reproducir en mayor escala la imágen de un objeto cualquiera, estatua, cuadro, etc. La figura 255 nos dispensará de hacer una descripcion detallada del megascopio; solamente diremos que debilitándose el brillo de la imágen á causa de la dispersion producida por la amplificacion, se hace uso de un reflector para dirigir los rayos del Sol sobre el objeto, obteniendo así la iluminacion que se necesita.

La *linterna mágica* es un megascopio en el cual la luz de una lámpara de reflector ilumina los objetos. Con este aparato se proyectan sobre una pantalla las imágenes de los objetos pintados sobre cristal con colores trasparentes. El tubo, á través del cual se colocan estas pinturas invertidas, contiene un sistema de dos lentes, una plano-convexa y la otra bicóncava, que reproducen una imágen recta en una pantalla colocada delante del instrumento.

Sirviéndose de la luz Drummond para alumbrar los objetos, se obtienen imágenes mucho más nítidas, y por lo tanto, apartando la pantalla y acercando las lentes, el aumento de éstas será bastante mayor.

A fines del siglo pasado, el físico belga Robertson alcanzó un éxito extraordinario dando funciones de apariciones de fantasmas que, en medio de la profunda oscuridad en que estaba el salon, parecian avanzar poco á poco hasta la mitad de él, creciendo al propio tiempo. Lograba producir esta ilusion con un aparato llamado *fantascopio*, enteramente análogo á la linterna mágica, es decir, compuesto de una caja que contenia una lámpara de reflector y de un tubo con dos lentes que proyectaban la imágen de una pintura sobre una pantalla colocada delante del instrumento. Solo que la linterna estaba sobre una mesa de ruedas, en uno de cuyos piés habia una polea que comunicaba su movimiento al objetivo por medio de una excéntrica y una palanca. Cuando la mesa

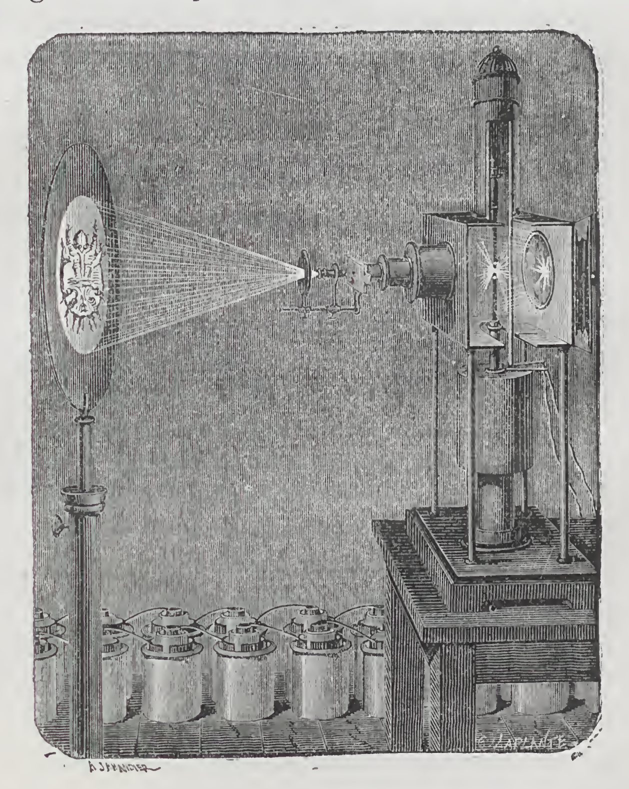


*Fig. 251.*—Microscopio foto-eléctrico

rodaba alejándose de la pantalla, el objetivo se acercaba poco á poco á la media bola, la imágen aumentaba y la ilusion producida era tanto más completa cuanto que por medio de un diafragma movible la luz que recibia la imágen variaba en proporcion de su tamaño.

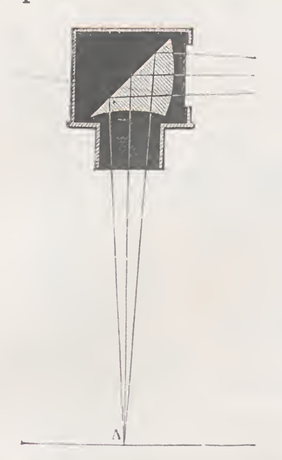


*Fig. 252.*—Lente-prisma de la cámara oscura

Robertson que, segun parece, debia el secreto de esta invencion á un pintor llamado de Waldech, tenia sumo cuidado de no dar paso á ninguna luz extraña y de evitar en lo posible el ruido del aparato, á cuyo fin habia forrado las ruedas de paño. Todo esto producia una ilusion que dicho físico procuraba aumentar imitando el fragor del trueno, el rumor de la lluvia, los gritos de los animales, etc.

En la figura 257 se ve que hay dos linternas y por consiguiente se puede proyectar en la pantalla, además de la imágen del espectro ó de cualquier otro personaje fantástico, la de un paisaje en armonía con la escena donde tiene lugar la accion del episodio.

El mismo aparato debe dar tambien las vistas *poliorámicas*, con cuya calificacion se designa los efectos de paisajes variados, la sucesion del dia á la noche, de la bonanza á la tempestad, etc. Cada linterna está dispuesta de modo que proyecta cada doble vista en el mismo punto de la pantalla. Una de ellas está al principio

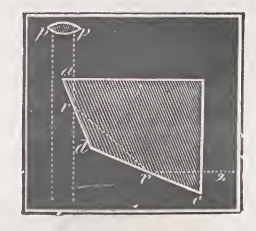


*Fig. 253.*—Cámara clara : marcha de un rayo luminoso en el prisma

cerrada y se ve el paisaje iluminado por el Sol; poco á poco va oscureciendo, llega el crepúsculo, se hace de noche é insensiblemente la segunda vista sustituye á la primera. Los niños, y áun tambien los mayores, se recrean en admirar esos cuadros y esos efectos de luz. Pero

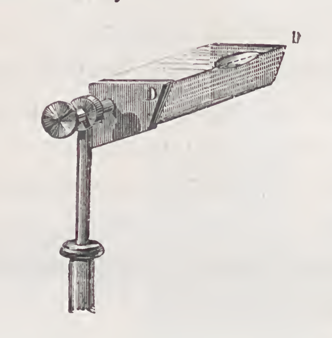


*Fig. 254.*—Cámara clara con su pié

como á nosotros nos interesa el principio físico más que los detalles discurridos para sacar partido de él, nos limitaremos á añadir que la cámara oscura, los megascopios, las linternas mágicas y los fantascopios están basados por igual en la formacion de imágenes reales por medio de lentes convergentes.

# CAPITULO IV

## EL TELESCOPIO

### I

#### LOS ANTEOJOS.—ANTEOJO DE GALILEO.—ACROMATISMO

El microscopio nos permite penetrar los misterios de lo infinitamente pequeño, poniendo al alcance de la vista humana los objetos más ínfimos, y haciendo ver de un modo distinto los mil detalles que envian á nuestros ojos una luz demasiado débil para impresionar la retina.

Lo que el microscopio hace con los objetos que están á nuestro alcance, pero que son demasiado pequeños, lo realiza el telescopio con análoga potencia con los objetos que por su gran distancia son invisibles, cualesquiera que sean sus dimensiones efectivas. Sondea las pro-

fundidades del espacio y hace accesibles á la vista astros cuya existencia no hubiera sospechado siquiera el hombre sin su auxilio. Aproxima los que se pueden observar á la simple vista, y entónces revela á la ciencia los detalles de su estructura, multiplicando así para satisfacer nuestra curiosidad los objetos que la naturaleza ofrece á la observacion, y con cuyo auxilio la inteligencia humana logra descubrir sus leyes.

El nombre de telescopio procede del griego como el de microscopio; uno y otro tienen por raíz comun la palabra *skopeo*, yo miro; *mikros* significa *pequeño* y *teleléjos*. La etimología permite pues aplicar el nombre de telescopio á todos los instrumentos cuyo efecto consiste en amplificar los objetos remotos haciéndolos parecer ménos distantes. En Francia se acostumbra reservar el nombre de *anteojos* á los telescopios exclusivamente refractores, formados tan sólo de ciertas combinaciones de vidrios ó lentes, al paso que el de *telescopios* se aplica más especialmente á los instrumentos, en los cuales entra un espejo ó un reflector; á veces se dice de estos últimos que son telescopios *catadióptricos*. Nosotros nos conformamos con el uso, por más que no esté muy justificado, y describiremos sucesiva y separadamente los anteojos y los telescopios.

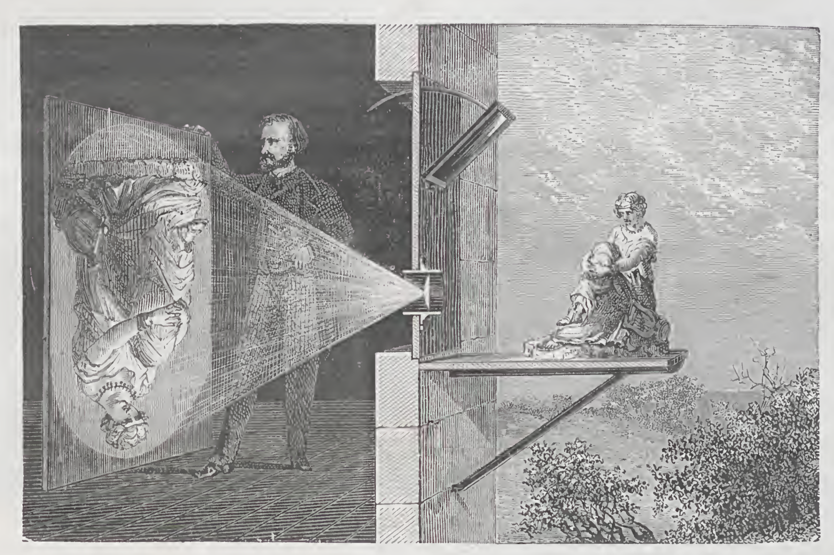


*Fig. 255.*—Megascopio

¿De qué fecha data la invencion de los anteojos? ¿Se sabe con toda certeza quién fué el inventor de este maravilloso instrumento de investigacion terrestre y celeste?

Los eruditos sólo dan respuestas dudosas á estas preguntas, como sucede con tantos otros descubrimientos científicos. Pero en este asunto se puede tener la seguridad de que la pretension de remontar el descubrimiento de los anteojos de aumento á la antigüedad y áun á la Edad media no tiene ningun fundamento sólido (1). La primera mencion de la posibilidad de combinar dos lentes, una cóncava y otra convexa, «para ver agrandados y distintos lo mismo los objetos próximos que los remotos», la hizo Porta á fines del siglo XVI. Pero quien realizó por primera vez esta combinacion y construyó el primer anteojo telescópico, fué Juan Lippershey, óptico de Midleburgo en 1606. Santiago Adrian Metuis en 1608 y Galileo en 1609 dieron á lo que parece con la solucion del problema óptico indicado por Porta, mas hay que advertir que el gran físico y astrónomo de Florencia habia tenido ya noticia del descubrimiento de Lippershey, aunque sin conocer ningun detalle preciso sobre el instrumento construido por éste.

¿Cómo consiguió el óptico holandés este resultado? No se sabe de cierto; como lo prueba

(1) Sólo nos referimos aquí á los anteojos compuestos. Los *simples* ó *antiparras* formados de un solo cristal para cada ojo, de una lente convergente ó divergente de largo foco, se conocian desde mucho tiempo ántes. Se hace remontar su invencion al siglo XIV, sin que se pueda designar con exactitud su verdadero inventor. Segun ciertos historiadores, lo fué un tal Salvino Armato de Florencia, en cuyo sepulcro se leia este epitafio:

*Qui giace*
*Salvino d'Armato degli Armati*
*di Firenze*
INVENTOR DEGLI OCCHIALI
*Dio li perdoni a peccata*
*anno D.* MCCCXVII

el que hay dos versiones diferentes acerca del asunto. Véase cuáles son, segun Arago.

«Jerónimo Sirturo, dice, cuenta que un desconocido, *hombre ó genio*, se presentó en casa de Lippershey, y le encargó muchas lentes convexas y cóncavas. El dia convenido fué á

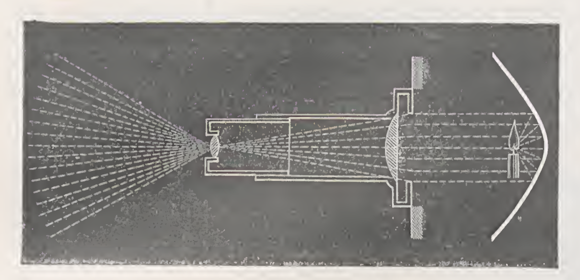


*Fig. 256.*—Linterna mágica

buscarlas, eligió dos, una cóncava y otra convexa, se las puso delante de un ojo, las separó poco á poco, sin decir si esta maniobra tenia por objeto examinar el trabajo del artista ó cualquier otra causa, pagó y partióse. Lippershey se puso al punto á imitar lo hecho por el desconocido, echó de ver la amplificacion motivada por la combinacion de las dos lentes, adaptólas á los extremos de un tubo y se apresuró á ofrecer el nuevo instrumento al príncipe Mauricio de Nassau.

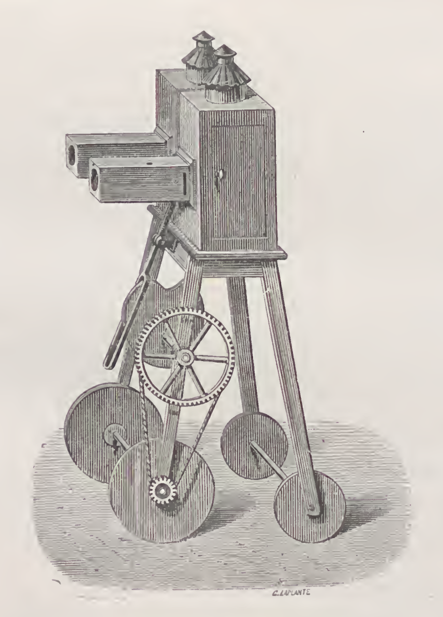


*Fig. 257.*—Fantascopio

»Segun otra version, hallábanse jugando los hijos de Lippershey en la tienda de su padre, cuando se les ocurrió mirar al través de dos lentes, una convexa y otra cóncava; puestos por casualidad estos cristales á conveniente distancia, les hicieron ver el gallo de la veleta del campanario de Midleburgo agrandado ó sumamente cerca. La sorpresa de los muchachos llamó la atencion del padre, el cual para hacer la prueba con más comodidad, puso primero los cristales en una tablita, y luégo los sujetó á los extremos de dos tubos capaces de entrar uno dentro de otro: desde aquel momento, *quedaba descubierto el anteojo.*» (*Astronomía popular*).

El anteojo se compone de dos partes esenciales, de dos sistemas de lentes: una de ellas, las más próxima al objeto que se examina, se llama por esta razon *objetivo*; por lo regular es una lente biconvexa, de largo foco, que produce una imágen real invertida del objeto. La segunda lente se adapta al ojo y se llama *ocular:* es en suma un anteojo de aumento simple ó

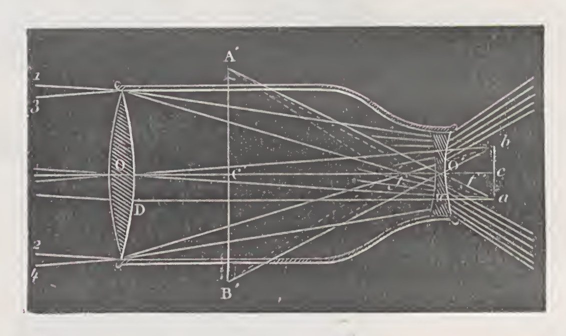



*Fig. 258.*—Marcha de los rayos luminosos en el anteojo de Galileo

compuesto, con el cual se examina la imágen que resulta agrandada hasta cierto punto.

El ocular de los primeros anteojos era, segun hemos dicho ántes, una lente bicóncava; la imágen invertida formada por el objeto resulta recta en este sistema, como puede comprenderse por la marcha de los rayos luminosos y la formacion de las imágenes que representa la fig. 258. El objetivo O considerado aisladamente da en su foco, que es el principal de la lente para los objetos muy remotos, una imágen *ba* del objeto observado. Ya hemos dicho que esta imágen aparece invertida, de lo cual es fácil cerciorarse recibiéndola en una pantalla. El ocular bicóncavo O', situado entre la imágen y el objeto, hace que diverjan los rayos luminosos ántes de que se reunan en el foco, impidiendo así la formacion de la imágen real. Estos haces penetran en el ojo á su salida del ocular, pareciendo llegar de los puntos A' y B' situados en sus ejes ópticos en sus puntos de convergencia. De aquí resulta una imágen virtual recta A' B', que parecerá nítida si las lentes están dispuestas de modo que la imágen se forme á la distancia de la vision distinta.

Hay una diferencia esencial entre el aumento de los anteojos y el de los microscopios. En estos últimos instrumentos, la imágen agrandada es mayor en realidad que el objeto mismo, es decir, el ángulo subtendido por la imágen es

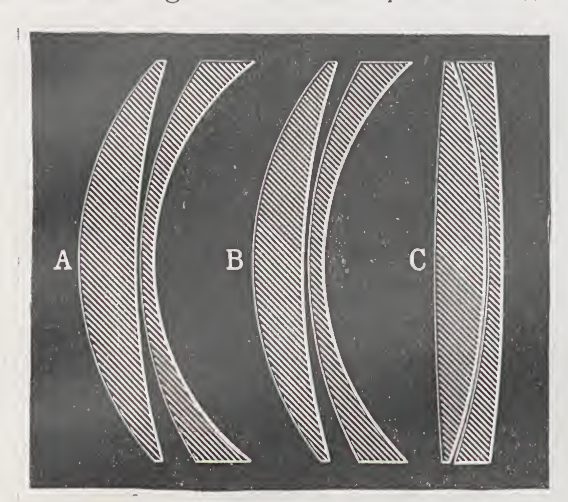



*Fig. 259.*—Lentes acromáticas. Objetivos de Gauss y de Herschel

mayor que el subtendido por el objeto, suponiendo que una y otro se hallen á igual distancia del ojo. En los anteojos, lo propio que en los telescopios de toda clase, la imágen es siempre inferior en dimensiones al objeto mismo, pero tambien mayor que la que se ve á la simple vista, consistiendo en esta amplificacion el aumento dado por los anteojos.

Así pues, el anteojo que acabamos de describir y que ha recibido el nombre de *anteojo de Galileo*, permite ver con dos lentes solamente los objetos *derechos* á la vez que los acerca ó agranda.



*Fig. 260.*—Anteojo de teatro con objetivo y ocular acromáticos

Los primeros anteojos de Galileo daban un aumento muy pequeño, de 4 á 7 diámetros; el más poderoso que se construyó y que usó el ilustre astrónomo aumentaba 32 veces. Esto le bastó para hacer gran número de descubrimientos que á la sazon se consideraron, y con justo motivo, como maravillas; entre ellos las montañas de la Luna, las manchas y el movimiento de rotacion del Sol, los satélites de Júpiter y las fases de Vénus, la descomposicion en estrellas de la gran nebulosa llamada Vía láctea, etc. El *Mensajero celeste (Nuntius sidereus)* que publicó para dar á conocer á los hombres de ciencia los resultados de sus investigaciones, apénas bastaba para consignar estos descubrimientos, que en breve constituyeron una rama de la astronomía desconocida de los antiguos: la *astronomía física.*

Hoy casi no se usa el anteojo de Galileo para los estudios astronómicos, pues su aumento es muy escaso: pero se le utiliza como anteojo terrestre y sobre todo para examinar los objetos poco distantes; no es otra cosa sino los *gemelos de teatro*, muy cómodos porque á amplificacion igual, son de mucha menor longitud que los anteojos de ocular convergente. Por lo demás, esta longitud debe poder variar segun las vistas, es decir, segun la distancia de la vision distinta para cada observador. Con este objeto, el ocular va adaptado á un tubo que puede salir y entrar en el que contiene el objetivo; con un boton que engrana con una barra dentada se puede variar poco á poco la distancia de los

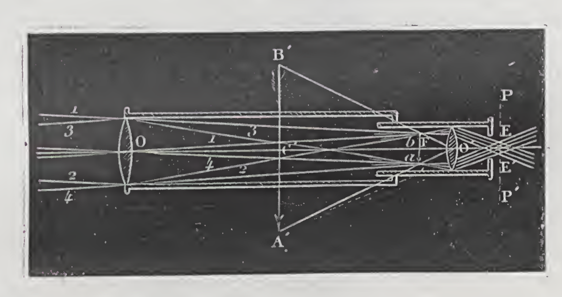



*Fig. 261.*—Marcha de los rayos luminosos en el anteojo acromático

vidrios y ponerlos de modo que se vea con toda claridad la imágen, lo cual se designa diciendo que se la *pone á foco*. Los míopes deben acortar el anteojo y los présbites alargarlo para ver distintamente.

El aumento en los anteojos de Galileo es igual á la relacion entre la distancia focal principal del objetivo y la del ocular.

El campo es poco dilatado, y como los rayos salen del ocular divergiendo, es preciso situar el ojo muy cerca del instrumento para no disminuir todavía dicha amplitud.

Creemos oportuno añadir algunas líneas acerdel perfeccionamiento introducido en la construccion de los anteojos á mediados del siglo anterior por el óptico aleman Dollond. Nos referimos al acromatismo de las lentes, del que ya nos hemos ocupado al hablar del microscopio.

Cuando una lente refracta un rayo de luz blanca, como los rayos de colores de que se

compone no tienen el mismo índice de refrangibilidad, se *dispersan*, de lo cual resulta una coloracion ó irisacion en los bordes de las imágenes formadas, cuya irisacion es un grave defecto por lo que respecta á la verdad y nitidez de las imágenes. Esta dispersion consiste en que cada uno de los rayos de colores tiene un foco distinto situado á una distancia de la lente que depende de la refrangibilidad del rayo. Dase á este defecto el nombre de *aberracion de refrangibilidad*, habiendo dado Dollond con un medio para evitarlo, á cuyo fin compuso los objetivos y los oculares de los instrumentos ópticos de dos ó muchas lentes distintas, ya convergentes ó bien divergentes, y variando la clase del cristal de que están formadas estas lentes.

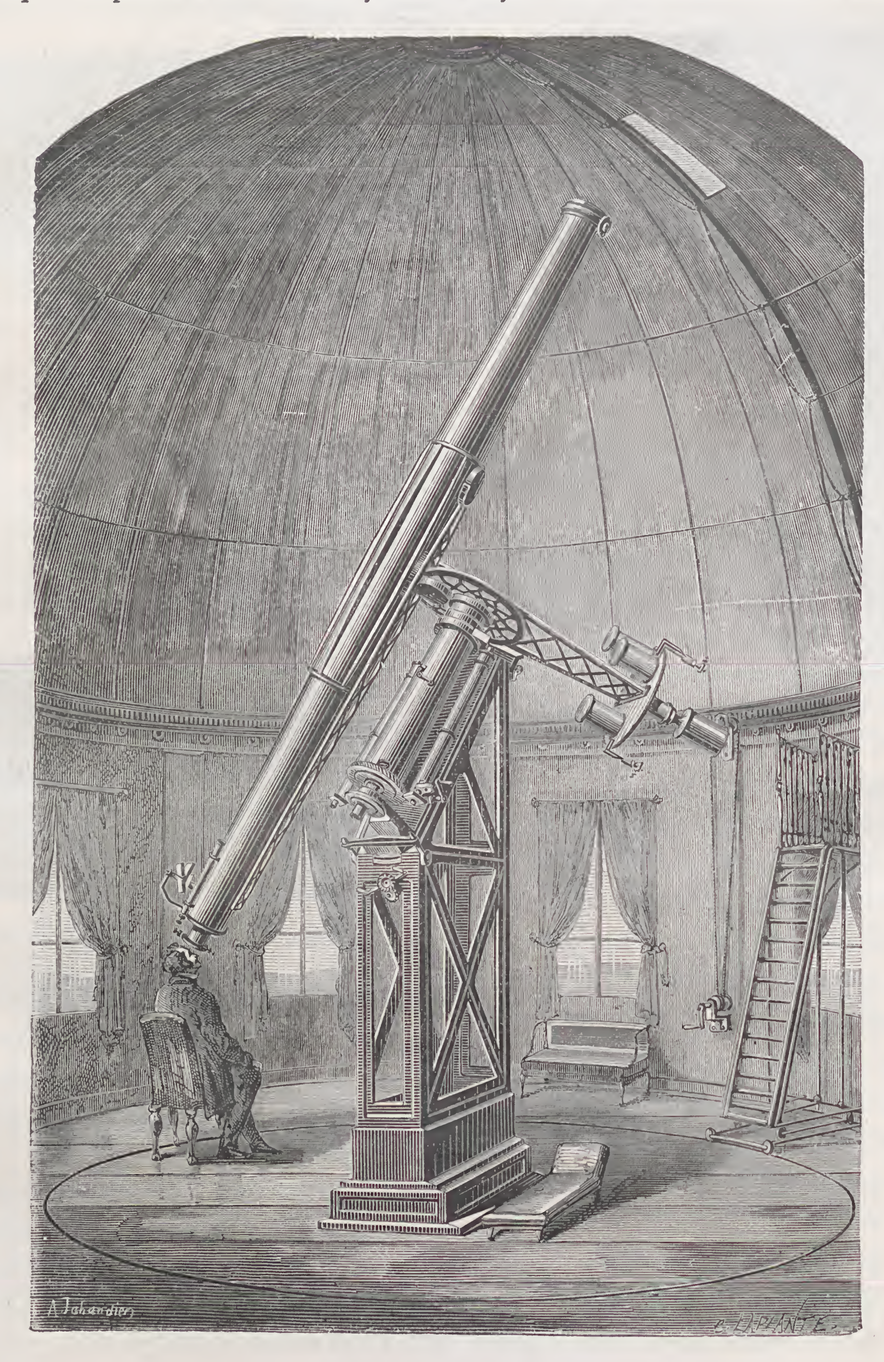


*Fig. 262.*—Gran anteojo ecuatorial del Observatorio de Paris

Formando la lente convergente con el cristal ordinario de los espejos *(crown-glass)* y la divergente bicóncava ó plano-cóncava con *flint-glass* (cristal en cuya composicion entra cierta cantidad de plomo), y dando además á las curvaturas de estas lentes yuxtapuestas valores que se deducen del cálculo ó de la experiencia, Dollond fabricó sistemas de lentes *acromáticas*, es decir, lentes tales, que al refractarse los rayos de luz blanca en la direccion requerida, conservaban su paralelismo al salir de la lente, ó

más claro, no se dispersaban. Posteriormente se ha variado de muchos modos las combinaciones pasa dar sistemas acromáticos. De este modo se consigue suprimir ó atenuar al ménos considerablemente el defecto de aberracion de

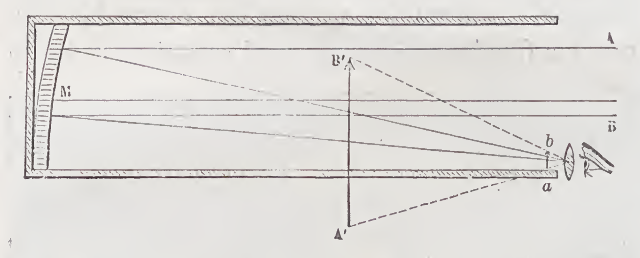



*Fig. 263.*—Principio y disposicion del telescopio *front-view* de Herschell

refrangibilidad en todo instrumento bien construido.

En el anteojo de Galileo el acromatismo resulta ya en parte de la circunstancia de ser divergente el ocular, al paso que el objetivo es una lente convergente. Cuidando de que el ocular sea de flint-glass y el objetivo de crown, se tendria el acromatismo, pero entónces las curvaturas de las lentes harian que la amplificacion fuese muy limitada, y por lo general insignificante. Por esta razon se prefiere emplear lentes en que se obtiene aparte el acromatismo.

La fig. 260 representa un anteojo de teatro, viéndose en ella cuál es la combinacion adoptada para el ocular y para el objetivo. Este último se compone de una lente bicóncava de flint metida entre otras dos convexas de crown, miéntras que el ocular es una lente convexa de flint interpuesta entre otras dos cóncavas de crown. Otras veces se acromatiza el objetivo solo, calculándose la curvatura del ocular de modo que aumenta la amplificacion.

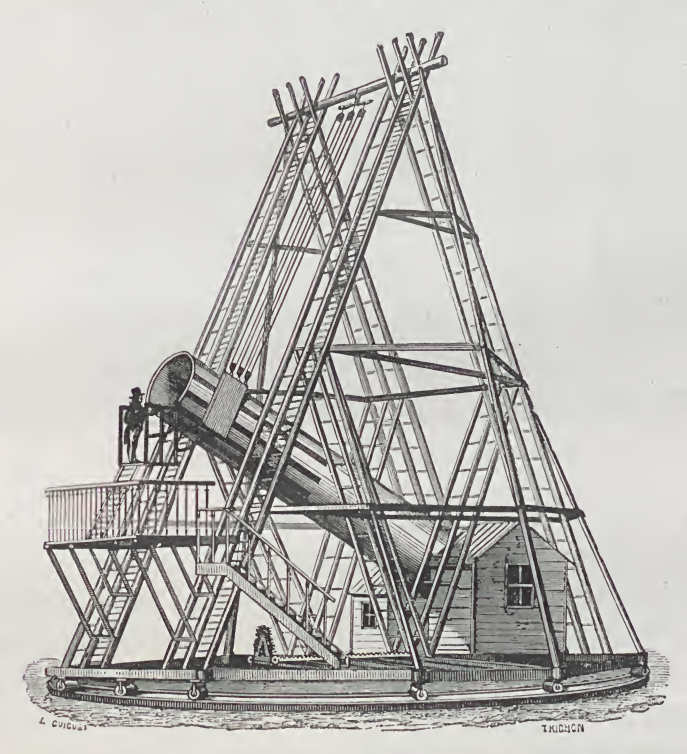


*Fig. 264.*—Gran telescopio de Herschel, en el observatorio de Slough

## II

### ANTEOJO ASTRONÓMICO

Pasemos ahora á tratar del *anteojo astronómico*, nombre que se da al telescopio refractor generalmente usado hoy para hacer observaciones astronómicas. Este anteojo consiste esencialmente en un sistema de dos lentes convergentes: una, el objetivo, da la imágen real é invertida del objeto; otra, el ocular, amplifica la imágen, pero conservándole su posicion invertida. No hay para qué decir que las dos lentes están hechas de modo que producen el acromatismo de las imágenes. Examinemos en la fig. 261 la marcha de los rayos luminosos en el anteojo astronómico, y comprenderemos fácilmente en qué difiere del de Galileo.

Los rayos partidos de la extremidad superior del objeto, que se supone situado á distancia infinita, forman un haz paralelo 1, 2, al llegar

al objetivo O. Al salir de este último, donde se refractan, forman por su convergencia en *a* una imágen de dicha extremidad. El haz 3, 4, emanado de la parte inferior, da á su vez una imágen real *b*, formándose en definitiva á la distancia focal principal del objetivo, en *ab*, una imágen real é invertida del objeto. Esta imágen es la que se ve agrandada gracias al anteojo ú ocular O', pero siempre invertida en A' B', es decir, á una distancia del ojo igual á la de la vision distinta.

Como en el anteojo de Galileo, el aumento es igual á la relacion que existe entre las distancias focales principales del objetivo y de la

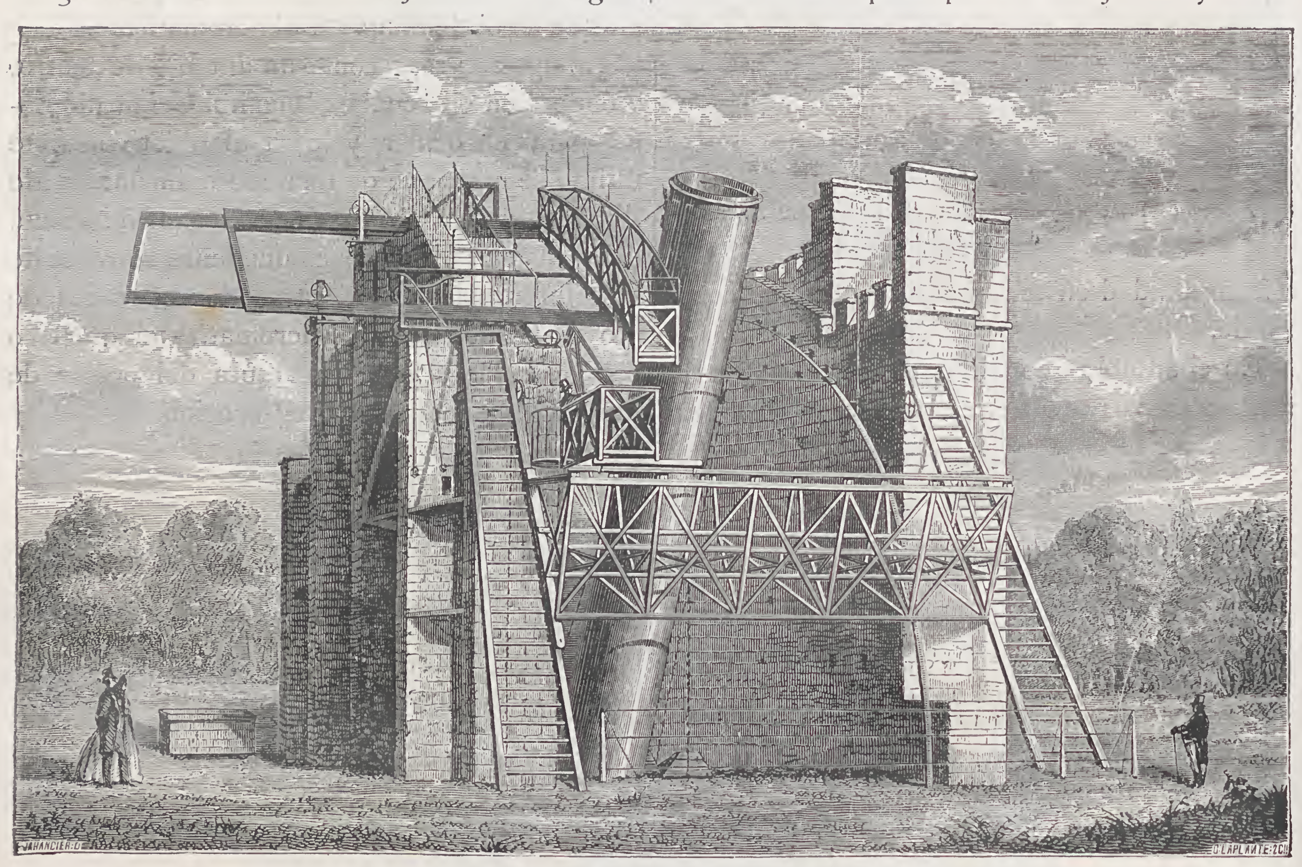


*Fig. 265.*—Telescopio lord Rosse, en Parsonstown (Irlanda)

lente. Así, cuanto más largo es el foco de la lente del objetivo y más corto el del ocular, mayor es la amplificacion linear del anteojo. Aquí sólo tratamos de los anteojos en que el ocular se compone de una sola lente acromáti ó no. El valor de la amplificacion se expresa con otra fórmula cuando el ocular se compone de un sistema de lentes.

La figura 268 indica cuál es la disposicion interior del anteojo astronómico.

El ocular consta de dos lentes plano-convexas separadas por un diafragma y adaptadas á un tubo que entra y sale en el tubo mayor que constituye el objetivo. Las dos lentes del ocular pueden estar dispuestas de modo que se correspondan sus superficies convexas; en este caso están situadas más allá de la imágen que se produce en el foco del objetivo, formando entónces el *ocular positivo* ideado por Ramsden. Huygens colocaba las dos lentes de modo que sus caras planas estuvieran vueltas en direccion del ojo (fig. 268), y entre ellas cae el foco del objetivo. Tal es el *ocular negativo.*

Por medio de un boton exterior, se introduce más ó ménos el tubo del ocular, hasta *ponerlo á foco*, es decir, en la posicion en que la imágen se ve perfectamente, lo cual depende de la amplificacion dada, de la vista del observador, y por lo que respecta á los objetos cuya distancia es comparativamente corta, de la lejanía de estos objetos. Por lo que hace á los cuerpos celestes, cuya distancia puede considerarse infinita, dicha posicion es relativa solamente á la amplificacion, es decir, al ocular empleado y á la vista del observador, la cual puede ser normal, míope ó présbite (1).

(1) Resulta de aquí que el valor del aumento, cuya expresion hemos dado más arriba, varía un poco segun la vista de los diferentes

Al instrumento va unido un buscador, anteojo pequeño adaptado paralelamente al anteojo principal y provisto en su foco de dos hilos cruzados en ángulo recto. Cuando la amplificacion del anteojo principal es un poco considerable, el campo es muy reducido, de suerte que valiéndose de él para observar algun objeto, cuesta trabajo hacer que éste venga á parar al campo del anteojo. Como el del buscador es comparativamente muy grande, se halla con él fácilmente el objeto, se le hace venir á parar al punto de interseccion de los hilos y entónces se puede ver si el objeto observado ó cuando ménos su parte central se encuentra en el campo del anteojo principal.

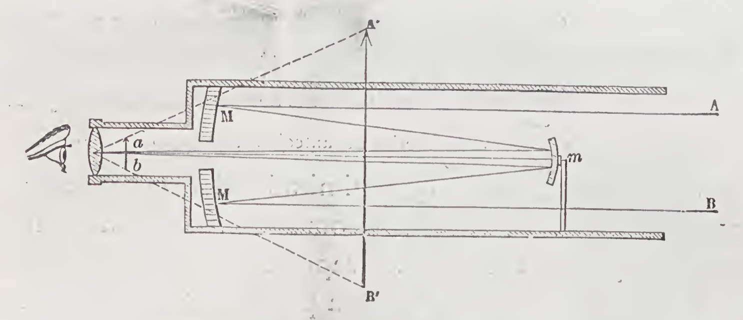



*Fig. 266.*—Principio y disposicion del telescopio de Gregory

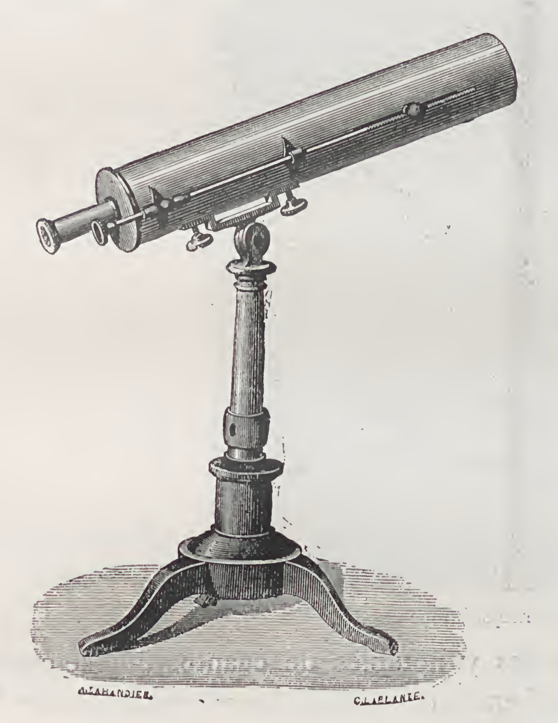


*Fig. 267.*—Vista exterior del telescopio de Gregory

Este lleva á su vez un sistema de hilos reticulares movibles, cuya posicion se arregla de modo que su imágen sea perfectamente discernible, lo cual sucede cuando el retículo se halla á la distancia de la vision distinta. En este mismo punto debe hallarse la imágen real formada por el objetivo, lo cual se consigue, segun hemos dicho ántes, introduciendo más ó ménos el tubo porta-ocular.

Los anteojos de gran foco de los observatorios astronómicos son tan pesados que con dificultad se los manejaria si no se los pusiera sobre un armazon del que dará idea la figura 269, con lo cual se consigue moverlos como se desee con la lentitud y la precision convenientes.

A juzgar por lo que dejamos expuesto acerca de la amplificacion de un anteojo astronómico, parece que esta depende del ocular para un mismo instrumento, ó mejor dicho, para un mismo objetivo. Y en efecto, un mismo anteojo puede dar aumentos variables merced al empleo de diferentes oculares de focos más ó ménos cortos. Así pues, teóricamente hablando, el poder óptico de un anteojo parece que debiera de ser ilimitado; pero á decir verdad, depende de otros elementos de los que apuntaremos algo.

La calidad de un anteojo y su poder óptico dependen principalmente del objetivo. Ante todo es indispensable que la materia de que está compuesto sea todo lo pura posible y que los vidrios de las lentes no tengan burbujas ni estrías. La talla y el pulimento de la superficie son tambien condiciones importantísimas, pues de su perfeccion depende sobre todo la nitidez de la imágen real que el objetivo forma en su foco.

Reunidos estos requisitos, y á igualdad de perfeccion, el objetivo que dará mayor amplificacion será aquel que tenga mayor diámetro, y cuya distancia focal sea mayor tambien. En

observadores. En vez de la relacion entre las distancias focales del objetivo y del ocular, que conviene al caso ideal en que la vista sea acomodada para percibir con nitidez los objetos situados al infinito, es menester tomar la relacion de la distancia focal del objetivo con la distancia en que la graduacion de este marca la posicion del ocular.

efecto, la claridad de la imágen virtual depende ante todo del brillo de la imágen real, y por consiguiente de la cantidad de rayos luminosos que contribuyen á formar la segunda, cantidad que está en relacion con el tamaño ó abertura del objetivo. Como la amplificacion del ocular disemina los rayos por un espacio más grande, la imágen virtual resulta tanto más débil y confusa cuanto mayor sea dicha amplificacion, á no ser que los rayos procedan de un punto

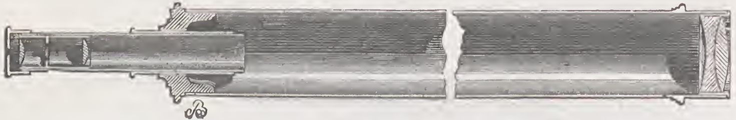


*Fig. 268.*—Vista interior del anteojo astronómico

luminoso de dimension imperceptible y que brille con luz propia como las estrellas. En este último caso, la atenuacion que dimana de la amplificacion es nula, y el brillo aumenta en razon de los cuadrados de las aberturas del objetivo y de la pupila del ojo. Así por ejemplo, el número de estrellas que se puede percibir con un anteojo de gran abertura en una extension limitada del cielo, crece considerablemente, como lo prueban las figuras 271 y 272. La una representa una pequeña porcion del cielo ocupada por la constelacion de los Gemelos, en la que sólo se perciben á la simple vista siete estrellas, pero M. Chacornac ha distinguido hasta 3205 con un anteojo de 27 centímetros de abertura. Suponiendo que la pupila tenga 6 milímetros de

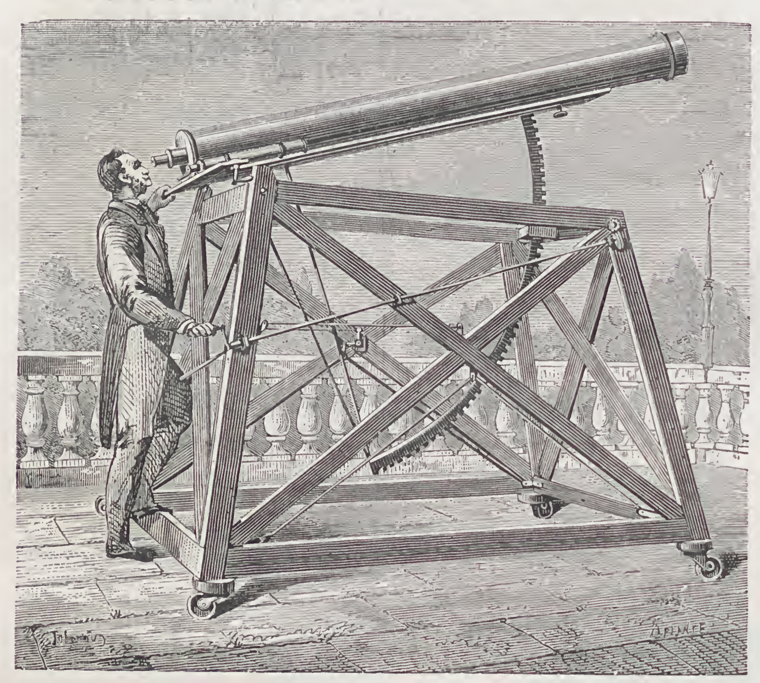


*Fig. 269.*—Vista exterior del anteojo astronómico

abertura, aumentaba el brillo en la relacion de 36 á 72,900 ó de 1 á 2,025, abstraccion hecha de la absorcion de la luz por la materia de que se componen las lentes.

Así se explica tambien la posibilidad de distinguir en pleno dia con los anteojos estrellas que no se pueden ver á la simple vista sino al anochecer ó de noche.

Los astros que no son luminosos por sí mismo, como la Luna y los planetas, tienen en los anteojos astronómicos menor brillo que á la simple vista, de lo cual resulta que el poder de amplificacion es limitado para un objetivo dado.

Entre los anteojos astronómicos más poderosos y notables de cuantos hoy se conocen, debemos citar los de los observatorios de París y de Pulkova, que tienen 38 centímetros de abertura y 8 metros de distancia focal, y el del observatorio de Cambridge (Estados Unidos), cuya abertura mide 47 centímetros, instrumento que es el mayor telescopio refractor construido hasta el presente (1).

(1) Háblase en estos momentos de un telescopio refractor cuya lente debe tener $0^{m}$,635 de diámetro, y que se está construyendo en Inglaterra. Alvan Clark, constructor del gran anteojo de Cambridge, ha emprendido la fabricacion de otra lente de $0^{m}$,69. Si el éxito corona esta osada tentativa, América tendrá la supremacía bajo este punto de vista.

## III

### ANTEOJO TERRESTRE Ó DE LARGA VISTA

Debemos á Keplero el descubrimiento teórico del anteojo astronómico ó de ocular convergente; pero el gran astrónomo no realizó su idea, siendo el P. Schneider el primero que construyó un anteojo de esta clase, que sustituyó poco á poco al de Galileo. Poco tiempo despues, Reita inventó el *anteojo terrestre* ó *anteojo de dia*, que sólo difiere del astronómico por la composicion del ocular. Merced á dos lentes convergentes de igual foco O″O‴, situadas entre el sistema O' del ocular astronómico y la imágen real del objetivo *a b*,

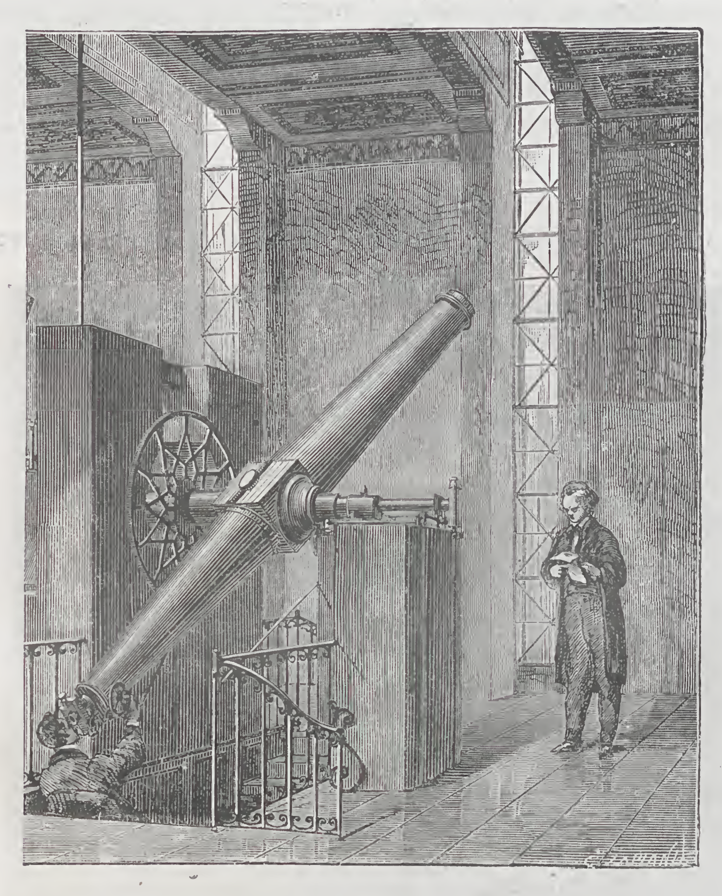


*Fig. 270.*—Meridiana del Observatorio de Paris

la imágen virtual *a' b'* aparece recta, como se comprenderá fácilmente, estudiando en la figura 273 la marcha de los rayos luminosos. En ella se ve que el sistema ocular del anteojo terrestre se compone de tres ó cuatro lentes.

La ventaja de esta combinacion consiste en que reproduce derechas las imágenes, circunstancia tan necesaria para los objetos terrestres. Su inconveniente está en la atenuacion de brillo que no permite emplear una amplificacion tan considerable con el mismo objetivo. La luz absorbida por su paso al través de las dos nuevas lentes es la causa de esta atenuacion, defecto de que no adolece el anteojo de Galileo.

Hoy se construyen anteojos de larga vista de todos tamaños y de vario poder óptico, tanto para objetos de utilidad como para distraccion y recreo. Antes de la invencion del telégrafo eléctrico, los empleados de las torres ópticas se servian para distinguir con claridad las señales de anteojos de larga vista cuyos objetivos tenian hasta 8 ó 9 centímetros de diámetro y $2^{m},50$ de distancia focal. Los marinos usan anteojos semejantes, aunque de menores dimensiones porque su manejo seria molesto á bordo; los *anteojos de noche*, de que se sirven por lo regular, son, ó anteojos de ocular simple como los astronómicos, ó de objetivo de gran diámetro, con objeto de recibir la mayor cantidad posible de luz y de que puedan verse los objetos en la oscuridad.

Para las casas de campo, se construyen anteojos de mayor alcance, porque se los puede instalar de un modo perenne sobre piés de va-

rias formas; están provistos de cierto número de oculares, unos terrestres y otros astronómicos, de distintos aumentos y con los cuales pueden los aficionados á la astronomía hacer muchas é interesantes observaciones.



*Fig. 271.*—Region de la constelacion de los Gemelos observada á la simple vista.

Por lo que hace á los instrumentos de astronomía propiamente dichos, requieren una perfeccion que hace su adquisicion relativamente costosa. El objetivo principal debe reunir á una gran pureza en la materia que lo forma, un trabajo de talla y de pulimento largo y difícil, sin el cual no es posible conseguir la nitidez de las imágenes ni su acromatismo. Por esto es necesario someterlos á varias y continuas pruebas, hechas por ojos expertos y acostumbrados á las observaciones celestes. Por lo comun se los aplica á estudiar ciertos objetos celestes de difícil observacion, á desdoblar algunas estrellas, á reconocer los detalles de estructura de las nebulosas ó de los anillos de Saturno, ó á examinar detenidamente los satélites de este planeta. En cambio hay otros objetos que se ven muy bien con casi todos los instrumentos, como por ejemplo la Luna, para la cual no hay anteojo malo.

Pero hay que abstenerse en lo posible de las grandes amplificaciones, excepto cuando se estudian las estrellas ó las nébulas. Un aumento regular, que dé mucha claridad y nitidez, es preferible á las amplificaciones exageradas que es costumbre aplicar á los instrumentos sin utilidad evidente.



*Fig. 272.*—La misma region de la figura anterior observada con el telescopio

## IV

### LOS TELESCOPIOS CATADIÓPTRICOS

El telescopio reflector ó catadióptrico, ó sencillamente, segun su nombre vulgar, el telescopio, difiere de los anteojos ó telescopios refractores en que el objetivo es un espejo ó reflector cóncavo en vez de una lente convergente. En este espejo se forma una imágen real del objeto, imágen situada en su foco principal cuando el objeto se halla á una distancia que se puede considerar infinita. Colocando convenientemente un ocular para examinar dicha imágen, se obtiene la amplificacion apetecida, como en el anteojo astronómico.

Zucchi ideó en 1616 la sustitucion del espejo á la lente objetiva, pero al astrónomo inglés Gregory le corresponde el mérito de la primera aplicacion efectiva, y áun puede decirse, de la invencion del telescopio. Segun veremos más adelante, la imágen del objeto amplificado por el ocular, se forma despues de reflejarse dos

veces en un espejo grande y luégo en otro pequeño, ambos cóncavos, de lo cual resulta una pérdida de luz bastante considerable. Newton discurrió disponerlo de otro modo, pero efec-

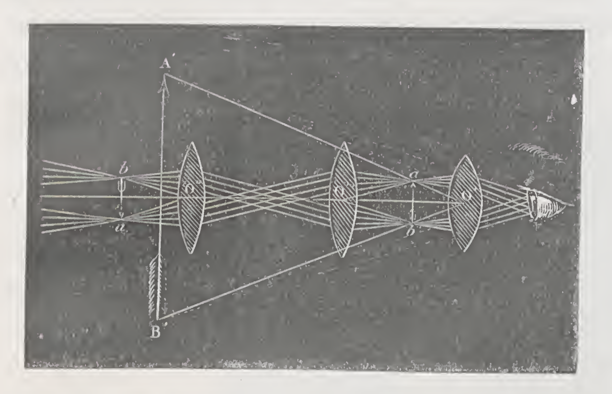



*Fig. 273.*—Marcha de los rayos luminosos en el anteojo terrestre

tuándose tambien la reflexion en dos espejos, y por fin Guillermo Herschel suprimió por completo la segunda reflexion en los telescopios de gran abertura que llevan su nombre. Empecemos por dar á conocer este último sistema, el más sencillo de todos.

En el fondo del tubo del instrumento (figura 263) hay un espejo cóncavo M que refleja los rayos AB emanados del objeto celeste, dando

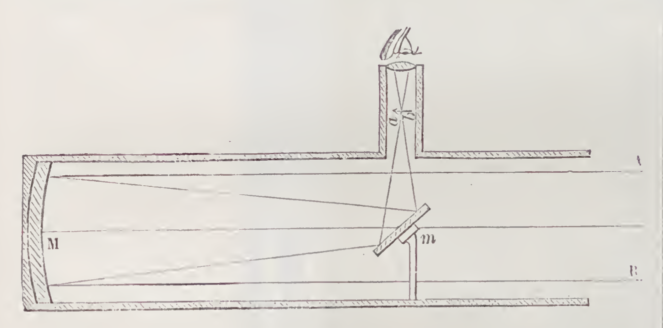



*Fig. 274.*—Principio y disposicion del telescopio de Newton

lugar con esta reflexion á la formacion de una imágen aérea ó real *ba* invertida. Por medio del ocular O situado delante del foco principal del objetivo y en el borde inferior del tubo del telescopio, se ve la imágen B'A' agrandada, pero siempre invertida, lo cual no ofrece inconveniente para las observaciones astronómicas.

Sólo es posible dar semejante disposicion á los telescopios cuyos espejos son de gran abertura, porque obligado el astrónomo á volver la espalda al astro para observar, intercepta con su cabeza gran número de rayos que dejan de penetrar en el instrumento. Por esto se da al espejo una posicion algo inclinada relativamente al eje del tubo. En un telescopio muy grande, la parte de la cabeza del observador que tapa en parte la abertura del tubo es una pequeña fraccion de la superficie del espejo; lo cual no sucederia en un telescopio de escasas dimensiones.

Conócense los telescopios de este sistema con el nombre de *telescopios front-wiew* ó *de vista de frente*, que les dió el mismo Herschel. El mayor de esta clase que construyó el ilustre astrónomo de Slough con arreglo á dicho modelo es el que representa la fig. 264 en su aspecto exterior. Tenia nada ménos que 32 piés y 4 pulgadas inglesas de largo (13 metros), y el diámetro del espejo era de 4 piés 10 pulgadas ($1^{m}$,47). «Semejantes dimensiones, dice Arago, son enormes, comparadas con las de los telescopios construidos hasta entónces; y sin embargo, parecerán mezquinas á las personas que hayan oido hablar de un supuesto baile dado en el telescopio de Slough. Los que pro-

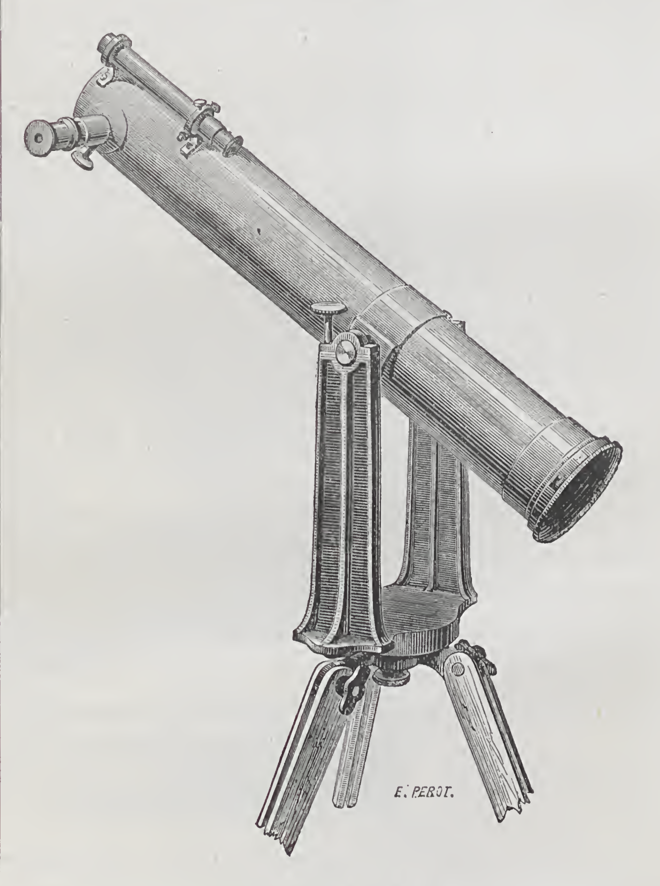



*Fig. 275.*—Telescopio de espejo plateado de Leon Foucault (sistema newtoniano)

palaron tal patraña confundieron al astrónomo Herschel con el cervecero Meux, y un cilindro en el cual apénas podia estar de pié el hombre de más corta estatura, con ciertos toneles, tamaños como casas, en los cuales se fabrica ó se conserva la cerveza.»

Un telescopio como aquel, que pesaba 20 quintales antiguos, era difícil de mover y manejar. Fué por lo tanto necesaria una ingeniosa combinacion de postes, poleas y cuerdas para su maniobra, que requeria la ayuda continua de dos jornaleros, aparte del ayudante encargado de observar la hora en el péndulo. Además, para observar con tan poderosos instrumentos se necesita que la atmósfera esté muy despejada, sin lo cual la amplificacion de las irregularidades aparentes procedentes de las refracciones atmosféricas, deforma las imágenes

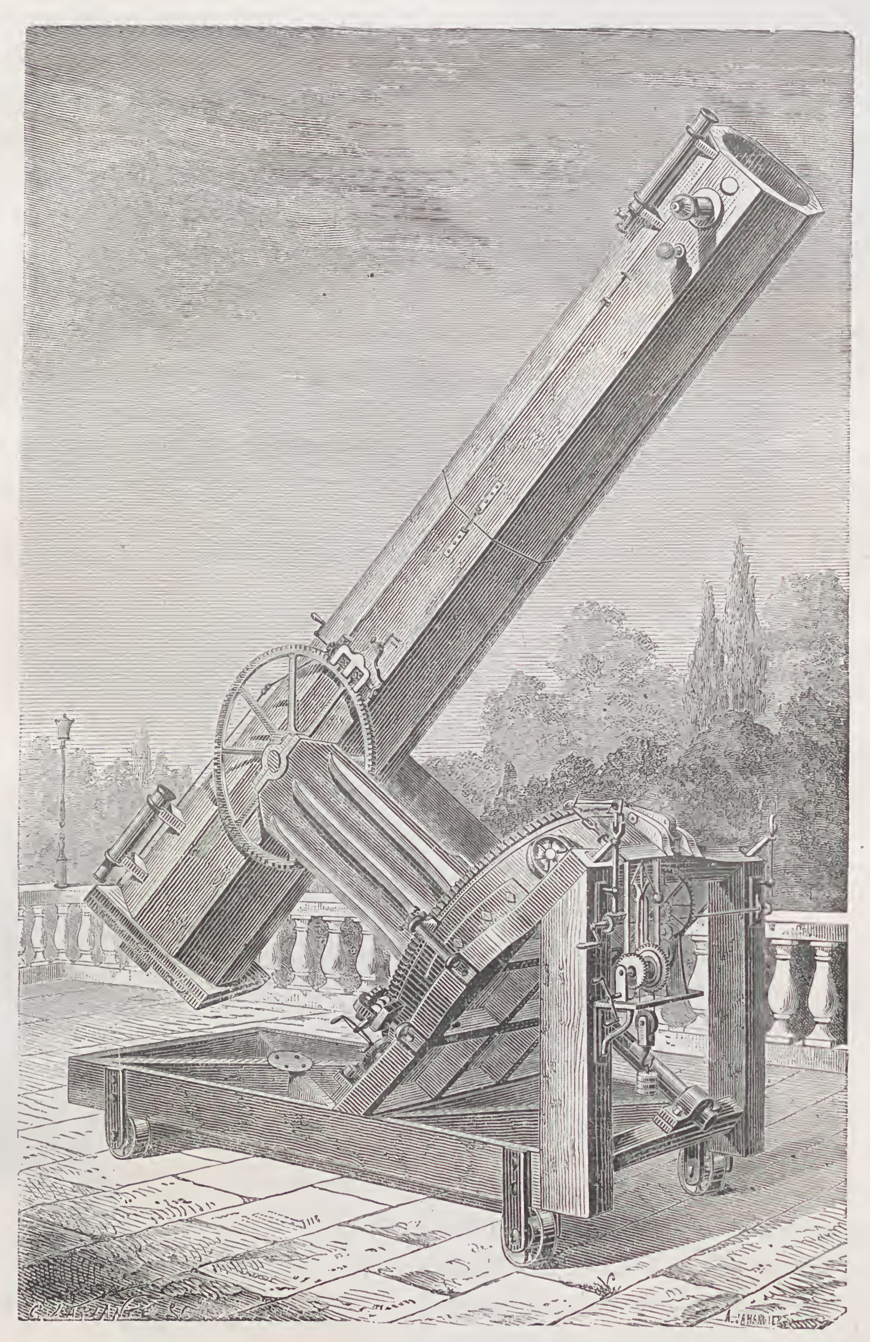


*Fig. 276.*—Telescopio de espejo plateado del Observatorio de Marsella

y las hace confusas. «Herschel decia que en Inglaterra apénas se cuentan cien horas en todo el año durante las cuales se pueda observar provechosamente el cielo con un telescopio de 39 piés que aumente 1000 veces. Esta persuasion indujo al célebre astrónomo á calcular que necesitaria lo ménos ochocientos años para hacer con su telescopio un exámen del cielo combinado de tal modo que el campo del instrumento se hubiera dirigido un solo instante á cada punto del espacio.»

El telescopio que lord Rosse ha construido é instalado en su parque de Parsonstown en Irlanda es todavía más colosal que el telescopio ya enorme de Herschel. Sólo el espejo metálico, de $1^{m},83$ de diámetro y unos 17 me-

tros de distancia focal, pesa cerca de 4000 kilógramos. El peso total del aparato óptico, tubo y espejo, no baja de 10,400 kilógramos, y da aumentos de 6000 diámetros; pero esta potencia amplificadora no es aplicable sino á la observacion de objetos muy luminosos, como las estrellas ó ciertas nebulosas. Con él no se pueden examinar ventajosamente la Luna ni los planetas, que sólo envian luz reflejada; por cuya razon se ha hecho uso con más éxito de tan magnífico instrumento en las investigaciones de astronomía sidérea. Este telescopio es el representado en la figura 265.

Pasemos ahora á ocuparnos del de Gregory. En el foco principal del gran espejo objetivo M M (fig. 266) situado en el fondo del tubo del instrumento, se forma una imágen aérea, real é invertida del objeto celeste AB. En sentido inverso al del gran espejo y en el mismo eje hay un pequeño reflector cóncavo *mn*. La imágen real focal del espejo mayor es un objeto para el menor; por consiguiente forma otra imágen real é invertida en *ab*, de suerte que esta es una imágen recta del objeto verdadero. Para dar salida á los haces de luz que la componen, el espejo grande tiene en su centro una abertura, delante de la cual se adapta el tubo del ocular, resultando de aquí que el observador tiene la vista directamente vuelta hácia la parte del cielo observada, como en el anteojo astronómico, y por tanto no intercepta la luz que cae sobre el objetivo. Con todo, esta luz sufre alguna disminucion, primero, por la abertura practicada en el centro que disminuye su superficie, pero sobre todo por la segunda reflexion en la superficie del espejo menor. Aquí está el inconveniente de los telescopios de Gregory, cuya principal ventaja consiste en la facilidad con que se hacen las observaciones sin que esto dispense de la necesidad de apelar á un pequeño anteojo paralelo ó buscador.

En los telescopios de Gregory, la imágen agrandada A'B' es recta, y gracias á ello se puede usar este instrumento como anteojo terrestre. Con una varilla exterior se puede desviar el espejo pequeño, de modo que se le ponga á foco; los míopes han de acercar el espejo al ocular ó al ojo; los présbites han de apartarlo. La puesta á foco es tambien indispensable cuando de la observacion de un objeto situado al infinito se pasa á una observacion terrestre de un objeto más ó ménos remoto, pero á distancia finita del observador.

El telescopio de Cassegrain es poco más ó ménos como el de Gregory; tiene los mismos inconvenientes y las mismas ventajas, aparte de ser un poco más corto, lo cual consiste en que siendo convexo el espejo pequeño, se le ha de colocar delante de la imágen real que forma el espejo mayor.

Réstanos describir el telescopio ideado por Newton (fig. 274). El espejo *m* que recibe los rayos luminosos emanados del objetivo M está colocado, como en el telescopio de Cassegrain, delante del foco principal á donde va á formarse la imágen real del objeto. Pero dicho espejo es un reflector plano inclinado 45°, de suerte que no hace más que reflejar la imágen, igual á la primera, en una direccion que está en ángulo recto con la de los rayos de luz ó con el eje del instrumento. Lateralmente á esta direccion hay practicada una pequeña abertura, en la que se coloca el tubo del ocular, de modo que se pueda examinar la imágen agrandada.

En lugar de un espejo plano, se suele poner un prisma rectangular, yendo á caer en la cara hipotenusa de este prisma los rayos reflejados por el objetivo, los cuales van á su vez á parar al ocular en virtud del fenómeno conocido con el nombre de *reflexion total*.

Guillermo Herschel construyó muchos telescopios para sus propias observaciones; él mismo labraba y bruñia los espejos y habia adquirido gran habilidad en estas operaciones, prolijas y delicadas por lo comun. Hé aquí algunos detalles interesantes acerca de este asunto, que tomamos de la excelente reseña de los trabajos del gran observador de Slough publicada por Francisco Arago:

«Antes de haber adquirido medios directos y seguros para dar á los espejos la forma de secciones cónicas, preciso le fué á Herschel, como á todos los ópticos predecesores suyos, procurar el modo de lograr su objeto á fuerza de pruebas y tanteos. Sólo que sabia discurrir estas pruebas de suerte que jamás perdia terreno. En su sistema de trabajo, lo mejor no estaba reñido con lo simplemente bueno, á pesar de lo que asegura un antiguo adagio. Cuando Herschel emprendia la construccion de un

telescopio, fundia (1) y moldeaba muchos espejos á la vez, diez por ejemplo.

»Ponia aparte el espejo que mejor resultado le daba en las observaciones celestes hechas en circunstancias favorables, y reformaba los otros. Cuando uno de estos resultaba por casualidad superior al espejo reservado, pasaba á ocupar el puesto de éste, hasta que otro salia mejor que él, y así sucesivamente. Al que desee saber hasta qué punto eran prolijas estas operaciones, aún en la época en que Herschel no era más que un simple aficionado á la astronomía en la ciudad de Bath, le diremos que hizo hasta doscientos espejos newtonianos de 7 piés ingleses ($2^m$,13) de foco; ciento cincuenta de 10 piés ($3^m$,05), y unos ochenta de 20 piés ($6^m$,096).

»Siempre que Herschel se ponia á bruñir un espejo de telescopio, tenia trabajo continuo para diez, doce ó catorce horas. No lo soltaba un momento de la mano, ni siquiera para comer, y su hermana tenia que presentarle los alimentos sin los cuales no hubiera podido soportar tan prolongada fatiga; Herschel no abandonaba su tarea por nada en el mundo, pues segun decia, hubiera sido malograrla.»

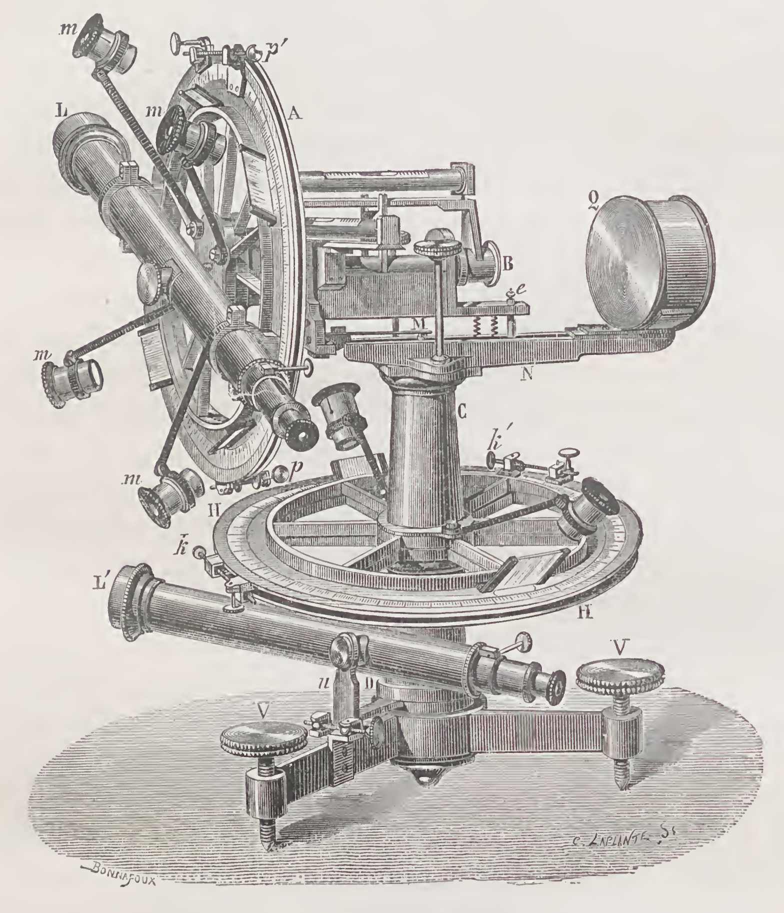



*Fig. 277.*—Teodolito de Gambey

A, círculo vertical graduado, móvil alrededor del eje horizontal B; L, anteojo ó alidada concéntrica que sirve para mirar la estrella cuya distancia zenital se quiere conocer, y que se lee en el círculo vertical; H, círculo horizontal ó azimutal graduado, en el cual se lee el ángulo trazado por el círculo vertical alrededor del eje C, cuando se han observado sucesivamente dos estrellas distintas; L, anteojo para mirar un punto remoto que sirve de referencia.

Los telescopios de espejos metálicos adolecen de graves inconvenientes; aparte del enorme peso del objetivo tan luégo como su abertura es de dimensiones considerables, tienen el defecto de que se han de bruñir muy á menudo los reflectores, que se empañan por efecto de la humedad atmosférica. El pulimento mismo es una operacion delicada, porque puede alterar la curvatura del espejo.

Leon Foucault ha logrado conservar al telescopio su principal ventaja sobre los anteojos astronómicos, cual es la de que no tengan aberracion de refrangibilidad, y además ha dis-

(1) El metal con el que se fabrican los espejos de telescopio es de bronce, compuesto de 67 partes de cobre y 33 de estaño. A veces se añaden escasas proporciones de laton, plata, arsénico y tambien platino. Esta aleacion tiene un tono amarillento y es susceptible de adquirir un hermoso pulimento.

minuido considerablemente, y á igualdad de diámetro, el peso del objetivo, y hecho que la curvatura del espejo sea poco ménos que inalterable. Para ello ha reemplazado con espejos de cristal los de metal, y ha evitado que adolecieran del defecto de aberracion de refrangibilidad trabajándolos por un método especial hasta dotarlos de una forma parabólica casi perfecta.

Por otra parte, ha aumentado el poder reflector del espejo plateando su superficie. Mediante una solucion de nitrato de plata amoniacal en alcohol, se puede cubrir esta superficie, á la temperatura ordinaria, con una doble película metálica, que se renueva fácilmente cuando el uso la deteriora, sin perjudicar en lo más mínimo la forma geométrica del espejo (1).

El hábil físico á quien nos referimos construyó y remitió en 1862 al observatorio de Marsella un instrumento de esta clase, hecho con arreglo al sistema newtoniano y montado paralácticamente á fin de poder observar la marcha de un planeta, de un astro, de una nebulosa, á medida que los arrastra el movimiento diurno, habiendo prestado en dicho observatorio grandes servicios á la astronomía física. El objetivo tiene 80 centímetros de diámetro y $4^{m},50$ de distancia focal. El ocular no es en rigor sino un microscopio, compuesto de modo que la imágen esté totalmente exenta de aberracion (fig. 276).

Se construyen telescopios de espejo plateado de pequeñas dimensiones que dan aumentos de 60 á 200 diámetros. El de la figura 275 representa el modelo de uno de estos telescopios que tiene 10 centímetros de diámetro y sólo 60 de distancia focal. Con un instrumento de esta clase, los aficionados pueden estudiar las estrellas binarias, observar los satélites de Júpiter, el anillo de Saturno, las manchas del Sol, y vislumbrar detalles muy interesantes de las montañas de la Luna.

## V

### VENTAJAS É INCONVENIENTES DE LOS ANTEOJOS Y REFLECTORES

Los telescopios que acabamos de describir pertenecen á dos clases principales: los refractores y los reflectores. El sistema ó aparato ocular de cada uno de ellos es el mismo: pero difieren esencialmente por el aparato objetivo. Unos y otros están en uso en todos los observatorios de ambos mundos, y más de una vez se ha discutido su valor respectivo. La verdad es que es difícil decidir de una manera absoluta. Hay casos en que uno de ambos sistemas prevalece y resulta inferior en otros; las ventajas y los inconvenientes se compensan más ó ménos, segun el instrumento, la habilidad del constructor, la del observador que hace uso de él y tambien el destino especial á que se le dedica.

Las ventajas de los refractores ó anteojos astronómicos son las siguientes: su manejo es más cómodo, sus objetivos más duraderos y tardan mucho en alterarse. Por último, á abertura igual, dan mayor claridad que los espejos. Los instrumentos meridianos y el mayor número de los ecuatoriales son telescopios refractores. En cambio, su instalacion es difícil y por consiguiente más costosa. Lo difícil que es obtener masas de cristal de dimensiones algo grandes, sin defectos, sin estrías, ha impedido largo tiempo que se construyeran anteojos de mucho diámetro. Cuando se ha logrado fundir una masa de dimensiones convenientes, el trabajo de talla ó de pulimento es muy grande, puesto que por cada objetivo hay que pulir cuatro superficies distintas, al paso que el objetivo de un reflector sólo tiene una superficie.

En esto consiste la principal ventaja del telescopio reflector. El espejo que constituye el objetivo está exento de aberracion de refrangibilidad; es necesariamente acromático, y lo único que hay que corregir en él es la aberracion de esfericidad. Pero la absorcion de la luz es considerable; el peso de la masa metálica hace que el manejo del instrumento sea difícil y molesto cuando su abertura tiene grandes proporciones; los agentes atmosféricos deterio-

(1) No puede decirse otro tanto del pulimento de los espejos metálicos. Cuando ha quedado terminado el trabajo largo y minucioso de obtener la curvatura conveniente en una superficie metálica, este resultado es por desgracia precario, como Leon Foucault hace observar con razon, y se encuentra en efecto comprometido tan luégo como el pulimento llega á alterarse por efecto de los agentes atmosféricos. «Con el cristal, dice, sucede lo contrario; una vez conseguida la curvatura, puede considerársela como definitiva, por cuanto las alteraciones que sobrevienen con el tiempo tan sólo influyen en la capa metálica depositada mediante una operacion que se puede repetir cuantas veces se quiera.»

ran muy pronto la superficie del espejo, y por último, cuando hay que bruñirla de nuevo, la superficie misma sufre alteraciones por lo que hace á su forma geométrica, necesitando nuevos retoques.

Sin embargo, ya hemos visto que la innovacion introducida por Leon Foucault obvia en parte estos inconvenientes, y en especial el último, por cuanto la superficie del cristal no experimenta alteracion alguna cuando se ha de renovar la capa de plata.

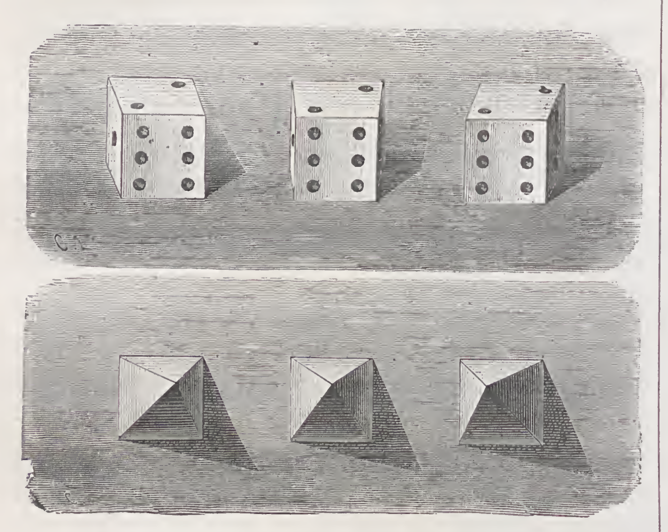


*Fig. 278.*—Diferencia entre la vision monocular y la bi-ocular

Pero los anteojos tienen tambien sobre los refractores la ventaja de que la columna de aire contenida en el tubo entre el ocular y el objetivo queda á cubierto de las perturbaciones procedentes de las desigualdades de la temperatura. En un telescopio reflector dicha columna está en comunicacion con el exterior, lo cual es un grave inconveniente. Los astrónomos Pablo y Próspero Henry han ideado una disposicion que la suprime y que, por este concepto, equipara el telescopio con los anteojos. Véase cómo explican las razones que les han inducido á construir un nuevo telescopio catadióptrico.

«Se ha discutido con frecuencia, dicen, la cuestion relativa á la superioridad de los anteojos sobre los telescopios, sin que se haya resuelto hasta el presente.

»Teóricamente y en razon de su acromatismo perfecto parece que los telescopios de reflexion debieran prevalecer en cuanto á nitidez y perfecta reproduccion de las imágenes sobre los anteojos con los cuales es casi imposible, dado el estado actual de la ciencia, evitar la aberracion secundaria de refrangibilidad.

»Sin embargo, en la práctica sucede lo contrario; desde el punto de vista del poder óptico, los anteojos han sido siempre superiores á los reflectores. Esta anomalía, atribuida á distintas causas, ha llamado vivamente la atencion de los astrónomos y sido siempre para ellos motivo de preocupacion.

»Nosotros hemos hecho muchísimas pruebas para averiguar de qué dimanaba esta inferioridad de los telescopios, y de nuestras indagaciones ha resultado que la falta de nitidez, ó más bien la instabilidad de las imágenes producidas por esta clase de instrumentos consiste casi exclusivamente en que se introducen en el tubo masas de aire de densidades desiguales, procedentes del exterior, y en que permanecen en él arremolinándose. Los rayos incidentes y reflejados sufren gran perturbacion al atravesar aquel medio heterogéneo, de suerte que sólo llega al ojo del observador una imágen confusa.

»Habíase sospechado ya esta causa de perturbacion, y se habian propuesto tambien varios medios para remediarla. Por ejemplo, se discurrió que practicando aberturas en la parte inferior del tubo del telescopio, resultaria un equilibrio de temperatura más completo entre el aire contenido en el tubo y el aire exterior, pero lo cierto fué que, en tales condiciones, las imágenes se han mostrado siempre más confusas que ántes.

»Háse aplicado á varios instrumentos otro procedimiento, preferible á nuestro modo de ver, y en especial al telescopio de M. Lassell y al de Melbourne; consiste en suprimir el tubo, por decirlo así, no conservando de él sino la porcion estrictamente necesaria para unir con firmeza el espejo objetivo y el ocular, sistema que sólo es eficaz en tiempo bonancible; pero si sopla la brisa más leve, las imágenes parecen agitadas.

»Los telescopios tienen otro defecto grave, que los hace muy incómodos y restringe su uso sobremanera. Este defecto consiste en que la superficie reflectora de los espejos se empaña muy pronto por efecto del contacto del aire, de la humedad, del polvo, etc. De estas varias causas de alteracion resulta una pérdida sensible de luz, que obliga á bruñir con frecuencia la superficie del espejo.

»Para allanar todos estos inconvenientes, se ha tratado naturalmente de rodear al telescopio de las mismas condiciones que al anteojo, cerrando al efecto herméticamente el tubo con una lente de cristal tallada de tal suerte que no amengüe en nada el poder óptico del instrumento.

»Nosotros hemos procurado hacerlo así del modo siguiente:

»En la abertura de un telescopio newtoniano de espejo de vidrio plateado, de $0^m,10$ de diámetro y $0^m,60$ de distancia focal, hemos puesto una lente de crown-glass del mismo tamaño que el espejo y ligeramente cóncava. Esta forma reune muchas ventajas: evita la duplicidad de la imágen, á la verdad muy débil, que resultaria de la interposicion de un vidrio plano; además, destruye la aberracion de refrangibilidad del microscopio ocular que en nuestro instrumento está sólo formado de vidrios simples. La pérdida de luz que resulta de la adicion de la lente, que puede ser muy tenue, es casi despreciable, y como dicha lente es plana, segun hemos dicho, no exige que la imágen se forme rigurosamente en su centro. Tanto ella como el espejo han sido retocados por el método de Foucault, á fin de constituir un sistema óptico enteramente exento de aberracion de esfericidad.

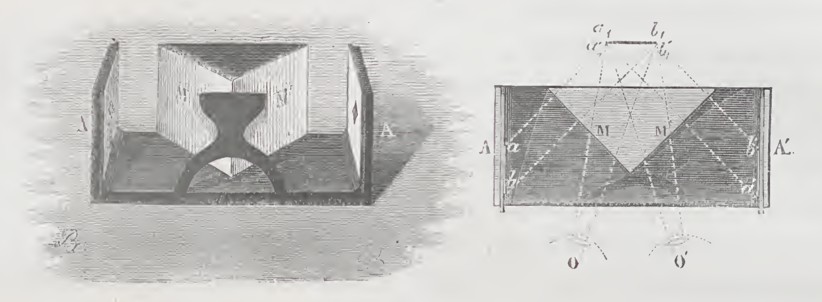



*Fig. 279.*—Estereóscopo de reflexion de Wheatstone

»Asestado este instrumento al cielo, ha dado resultados notables. Con él se ha podido desdoblar siempre la estrella *sigma*² de Cáncer, cuyas dos componentes sólo distan 1″,5 entre sí; se veia fácilmente la compañera de Rigel, y la imágen de cualquier estrella brillante ha parecido siempre más fija en este telescopio que en otro de igual abertura, pero construido del modo comun.»

El que quisiera tener idea exacta de los importantes servicios que los telescopios han prestado de dos siglos á esta parte á las ciencias de observacion y más especialmente á la astronomía, deberia consultar la historia de estas mismas ciencias; á cada página se detendria asombrado ante la magnitud de los resultados. Pero no deberia limitarse á pasar revista á las curiosidades, á las maravillas del cielo ni contentarse con sondear las profundidades de los espacios infinitos en los que brillan los sistemas estelares y las nébulas; seria menester que estudiara detenidamente los progresos que merced á estos instrumentos ha hecho la astronomía de precision, así como que fijara su atencion en las sublimes teorías que en la actualidad explican todas las leyes de los movimientos celestes, considerando el universo entero como un sistema de cuerpos que actúan unos sobre otros, sistema que ofrece á los geómetras, en escala infinita, como la aplicacion más admirable de los teoremas de la mecánica racional.

El público, que por lo comun, sólo conoce de oidas los trabajos de los observatorios, no puede darse cuenta de su importancia relativa, y está siempre dispuesto á colocar en primer término las observaciones á propósito para excitar su curiosidad. Aplicar el ojo al ocular de un telescopio de mucho alcance, contemplar *de visu* los fenómenos cuya descripcion ha leido, ó cuyas reproducciones más ó ménos fieles ha admirado en los grabados, es para él el logro de sus aspiraciones, el ideal del astrónomo improvisado ó aficionado.

Y lo cierto es que por grande que haya sido en lo pasado y pueda ser en lo futuro la aplicacion de los instrumentos de óptica á los estudios de astronomía física, no es comparable con los servicios que estos mismos instrumentos han prestado á la astronomía de precision. La averiguacion de las posiciones de las estrellas fundamentales, que se ha podido hacer con per-

feccion siempre creciente gracias á los grandes instrumentos meridianos, las observaciones de los planetas, de la Luna, y del Sol, han proporcionado á la teoría del sistema del mundo datos cada vez más seguros, han permitido que se calculen tablas de las posiciones futuras de esos astros, teniendo en cuenta las influencias recíprocas que sus masas ejercen entre sí. Esos trabajos prolijos, esas observaciones delicadas, esos cálculos laboriosos que son su consecuencia, constituyen la tarea culminante, capital de los grandes observatorios, y hubieran sido imposibles sin el concurso simultáneo de los perfeccionamientos introducidos en los métodos de observacion, en los instrumentos que sirven para medir el tiempo, y en los que, teniendo por objeto la determinacion de los ángulos, están basados en las leyes rigurosas de la óptica.

Las teorías de la mecánica celeste, profundizadas y desarrolladas de continuo, son el resultado magnífico de esta aplicacion de la óptica á la astronomía (1).

Mas áun cuando las conquistas que los anteojos y telescopios han hecho por otros conceptos no parezcan tener gran importancia desde el punto de vista de la ciencia pura, tampoco dejan de ser brillantes y fecundas. Las primeras aplicaciones de los anteojos, que en sus comienzos fueron de bien modesto alcance, ensancharon de pronto los límites del cielo circunscrito hasta entónces á los objetos visibles á la simple vista. Cuando tres siglos atrás asestó Galileo al cielo el anteojo que acababa de construir, se quedó sorprendido al ver el considerable aumento en el número de las estrellas, sobre todo junto á la Via láctea, cuya verdadera composicion le reveló aquel instrumento. Las manchas del Sol, los satélites de Júpiter, las fases de Vénus fueron otros tantos fenómenos nuevos que debian estudiar los astrónomos. Sucediéronse los descubrimientos unos á otros á medida que los ópticos conseguian aumentar el alcance de los instrumentos, y como era consiguiente, se inventaron nuevos métodos de investigacion. En otro lugar hemos descrito los resultados que se obtuvieron de la aplicacion del análisis espectral á la luz de los cuerpos celestes. A ellos hay que agregar los que ha dado la fotografía, de la que hablaremos en los capítulos siguientes. Estas dos ramas de la Optica aplicada á la Astronomía han adquirido hoy tal desarrollo, que los astrónomos las consagran casi exclusivamente su tiempo y los recursos de sus observatorios.

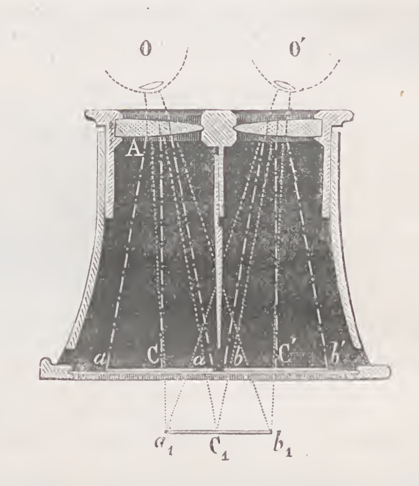


*Fig. 280.*—Vista interior del estereóscopo de refraccion

(1) Aparte de su aplicacion á los estudios astronómicos, los anteojos son de un uso precioso en los trabajos en que se requiere medir ángulos con toda exactitud, como los de la geodesia. Propiamente hablando, los instrumentos son los mismos en una y otra ciencia y los instrumentos comunes á ambas. Así es que los geodestas se sirven del anteojo meridiano como los astrónomos, sólo que su construccion está algo modificada con objeto de hacer portátil el instrumento. El *teodolito*, representado en la fig. 277, sirve para medir la altura angular de un punto ó de un astro sobre el horizonte á la vez que para determinar su azimut, es decir, el ángulo que forma el plano vertical en el que se encuentra este punto en el momento de la observacion con un plano que sirve de orígen y que es, ora el plano meridiano, ó más bien un plano perpendicular al meridiano, el *primer vertical*. La leyenda de la figura bastará para que se comprenda cómo se consigue uno y otro objeto con el teodolito.

# CAPÍTULO V

## EL ESTEREOSCOPO (1)

### I

#### LA VISION EN RELIEVE.—EL ESTEREÓSCOPO DE REFLEXION DE WHEATSTONE

Cuando examinamos sin otro auxilio que el de nnestros ojos un árbol, un paisaje, un monumento, no tan sólo tenemos la sensacion de un cuadro, es decir una representacion plana de los objetos que se pintan en nuestra retina; sino tambien la impresion, clara y definida, del relieve de los objetos, de sus distancias desiguales, de los espacios que los separan; la profundidad del espacio es una sensacion intuitiva que resulta simplemente del fenómeno normal de la vision.

¿Cómo es que los cuadros pintados no producen semejante sensacion, por grande que sea el mérito del artista que los ha ejecutado, y la fidelidad de la perspectiva, de los contornos de los objetos, del colorido y de sus tonos? Mucho talento se necesita para dar vida y movimiento á un cuadro, profundidad á un paisaje, pero aunque el pintor lo consiga, la ilusion del relieve dista mucho de igualar á la naturaleza.

Mucho tiempo ha trascurrido sin que se tuviera en cuenta la diferencia que existe entre la representacion plana y la vista real, ó sea la vision en relieve. Y sin embargo hay un medio muy sencillo de averiguar la causa. Si despues de observar un objeto real con los dos ojos, se le examina con uno solo, sea el derecho ó el izquierdo, desaparece al punto el relieve, la sensacion de profundidad, ó á lo ménos se atenúa en gran parte. El paisaje real parece entónces una pintura cuyos varios términos se confunden. Sin embargo, esta diferencia entre la vision ordinaria ó binocular y la monocular es casi insensible respecto de los objetos remotos; y bastante marcada respecto de los próximos, llegando á su máximo con relacion á los que están en primer término.

Sentado este primer punto, veamos qué sucede cuando se examina un objeto de relieve con un solo ojo. Cualquiera puede comprobarlo de un modo muy sencillo. Tomemos por ejemplo un cubo, un dado ó una pirámide cuadrangular (fig. 278).

Situémoslos en el plano que pasa por la línea media de entrambos ojos, y miremos cada uno de ellos con los dos ojos: las dos figuras A y B representarán los dos objetos vistos de este modo. Cerremos el ojo izquierdo, y el aspecto cambiará. La cara lateral de la derecha del dado A' parecerá mayor, miéntras que la de la izquierda habrá desaparecido; las caras laterales de la pirámide B' serán de desigual tamaño aparente, estando la mayor á la derecha. Si cerramos el ojo derecho sucederá lo contrario, como lo muestran las figuras A″ y B″.

Se pueden hacer mil experimentos análogos con los objetos más ó ménos remotos que se tienen delante, reconociéndose que la vista con el ojo derecho solo descubre partes que permanecen ocultas cuando se mira únicamente con el izquierdo. Debe deducirse de esto que en cada retina, derecha é izquierda, se pinta una imágen diferente del mismo objeto, de suerte que deberia resultar una doble imágen para la vision monocular. Pero la experiencia prueba que no es así, que estas dos imágenes se sobreponen produciendo una sola sensacion en la que se encuentran reunidas las partes componentes de las imágenes. La vista completa ó normal envuelve los objetos en relieve, por decirlo así, y tanto más cuanto más próximos están.

Júzguese por esto la necesidad de acomodar el órgano visual, segun las circunstancias, para

(1) La costumbre generalmente admitida de dar este nombre al instrumento de que se va á tratar, nos induce á escribirlo así, por más que atendiendo á su etimología, debiéramos decir *estereoscopio*, por o cosmo que decimos telescopio, microscopio, espectroscopio, grolarismipio, etc. (*N. del T*).

ver bien los objetos, y se comprenderá la diferencia que hemos indicado entre la sensacion que produce la vista binocular de los objetos reales y la del cuadro mejor pintado que representa los mismos objetos. En este último caso, siempre se pinta la misma imágen en las dos retinas, y la vision de relieve, la *vision estereoscópica* (de las palabras griegas *stereos* sólido, y *scopein*, ver), es imposible,

El invento de los instrumentos de óptica conocidos con el nombre de *estereóscopos* se debe al análisis de estos fenómenos. El célebre físico inglés Wheatstone fué el primero que concibió esta idea, realizándola en el pepueño aparato que lleva el nombre de *estereóscopo de reflexion*. Véase en qué consiste.

M y M' (fig. 279) son dos espejos situados verticalmente en ángulo recto sobre una tablita triangular, de modo que forman ángulos de 45° con los bordes de esta tablita. A los lados de la misma hay dos montantes provistos de correderas que pueden recibir así dos imágenes de la misma vista, del mismo objeto ó del mis mo cuadro. Es evidente que estas imágenes se reproducirán en cada uno de los espejos y formarán dos imágenes virtuales, situadas en apariencia detrás de cada espejo simétricamente con relacion al objeto mismo. Así por ejemplo $ab$ producirá la imágen $a_1 b_1$ y los mismos puntos $a$ $b$ del objeto de la derecha formarán otra imágen $a_1$ $b_1$, que se sobrepondrá exactamente á la primera.

Así pues, si los dos ojos O O' están situados delante de cada espejo, y si un diafragma impide que cada uno de ellos vea la imágen producida en el espejo contiguo, las dos imágenes $a_1$ $b_1$ y $a'_1$ $b'_1$ parecerán partir de los mismos puntos del espacio; y se pintarán en las retinas de cada ojo como sucederia si estos contemplasen un objeto real. Ahora, ¿qué se necesita para que haya identidad completa entre los fenómenos de vision del objeto real y de este mismo objeto pintado ó reproducido en un cuadro? Que las dos vistas separadas sean precisamente las que percibiria cada uno de los dos ojos, si las examinara respectivamente desde el punto de vista en que se ha colocado el artista.

Esta es una condicion indispensable de la vision estereoscópica; si se realiza, se efectuará la superposicion de las imágenes como en la naturaleza misma, y se tendrá á la vista, no ya una superficie plana, sino una vision de relieve, tanto más perceptible y viva cuanto que los cuadros se reproducirán con mayor fidelidad, con todos sus detalles de sombras y matices. Si carecen de colorido, creeráse ver objetos de mármol, una verdadera reproduccion escultórica de la naturaleza (1).

No pasó mucho tiempo sin que se introdujese una modificacion en el estereóscopo de reflexion de Wheatstone, ó por lo ménos sin que Brewster, basándose en su principio, inventara un instrumento más cómodo y más completo, modificado á su vez por los distinguidos ópticos franceses Soleil y Duboscq.

Pero ántes de describir el estereóscopo de refraccion, digamos algo acerca de un procedimiento muy sencillo para conseguir la vision estereoscópica de las imágenes Para ello basta poner uno junto á otro los dos dibujos convenientemente reproducidos, é interponer un diafragma, una hoja de papel ó un carton, ó una tablilla delgada, en la línea media, entre los dos ojos. A los pocos segundos, las dos imágenes se sobreponen y el relieve aparece. Pero es un ejercicio que cansa la vista, y los estereóscopos, tal como se sabe construirlos, tienen marcada ventaja sobre este sistema elemental de espectroscopia.

## II

### ESTEREÓSCOPO DE REFRACCION DE BREWSTER.—ESTEREÓSCOPO DE HELMHOLTZ.—PSEUDÓSCOPO

Ocupémonos ahora del *estereóscopo de Brewster* (fig. 280).

En él, no se examinan las dos imágenes por su reflexion en la superficie de los dos espejos, sino directamente, aplicando ambos ojos á los dos cristales, formados de dos porciones A A' de un prisma ó de una lente convergente.

Consideremos un mismo punto C C' del dibujo representado en cada vista estereoscópica;

(1) «Los efectos del estereóscopo se notan de la manera más sorprendente examinando dibujos que sólo representan contornos de cuerpos y superficies y que carecen completamente de todas las circunstancias favorables accesorias de color, sombra, etc.; á pesar de lo cual las líneas negras se destacan perfectamente del papel y parecen localizarse en el espacio. Los dibujos de estereotomía más complicados, los que representan cristales presentando á la vista una confusion de líneas casi inextricable, se resuelven como por encanto para ofrecer el aspecto del relieve.» (Helmholtz, *Optica fisiológica.*)

cada uno de estos puntos envia un haz de luz que se refracta en uno y otro prisma, resultando dos imágenes que se forman en el mismo punto $C_1$, más allá del plano del dibujo. Lo propio sucede con todas las partes correspondientes del cuadro, de suerte que hallándose las dos vistas estereoscópicas representadas simultáneamente en $a_1 b_1$, la de la derecha impresiona la retina derecha, y la de la izquierda la de este lado. La vision de relieve resulta con gran perfeccion si las imágenes son reproducciones fotográficas exactas, y más aún si se han sacado rigurosamente de puntos de vista convenientes y en favorables condiciones de luz.

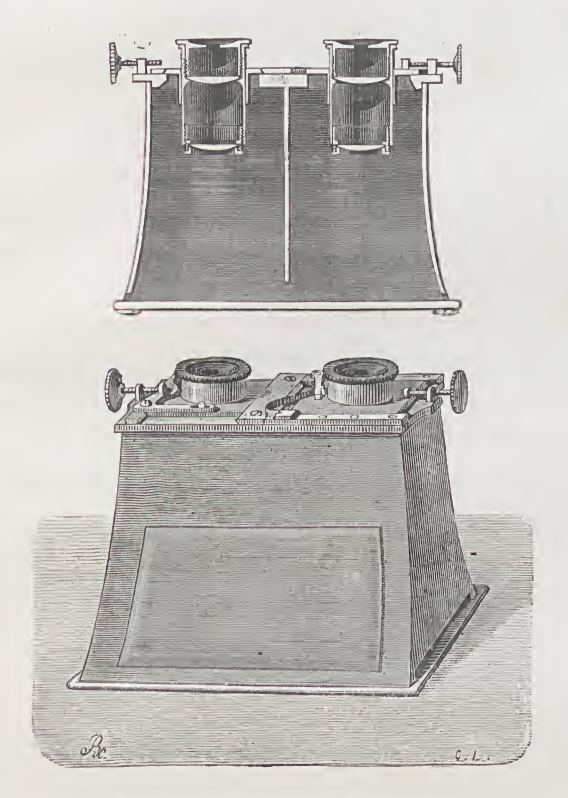


*Fig. 281.*—Estereóscopo de Helmholtz

Es necesario iluminar por igual las dos imágenes, lo cual se consigue llevándose el estereóscopo á los ojos en direccion perpendicular á la de la luz, de modo que esta penetre por cada lado por la abertura practicada al efecto en el diafragma. Si las vistas fotográficas son sobre cristal y por tanto trasparentes, bastará colocar el aparato de frente á la luz del dia ó á la de una lámpara, en cuyo caso la cara posterior del estereóscopo lleva un cristal raspado que da paso á la luz tamizada por igual é intercepta las imágenes de los objetos exteriores.

El estereóscopo no comunica solamente la sensacion del relieve; sino que tambien produce el efecto de las lentes convergentes ó de los anteojos de aumento, es decir, que agranda las imágenes, y por consiguiente facilita el estudio de sus detalles. Con este objeto, y á fin de hacer mayor la amplificacion, se reemplazan los prismas con combinaciones de lentes, como la representada en la fig. 281, ó sea el estereóscopo construido por el doctor Helmholtz, profesor de fisiología en Heidelberg. Aparte de la modificacion introducida en los oculares, se distingue este instrumento por un mecanismo especial merced al cual se puede graduar la distancia de los dos oculares, ó aumentar ó disminuir como se quiera la distancia de los ojos ó de las lentes en los cuadros estereoscópicos. Esta disposicion es útil, porque las imágenes estereoscópicas no siempre están colocadas de modo que la distancia de los puntos correspondientes sea igual á la de los ojos, ó que sean tambien iguales sus alturas sobre la línea de base. Por medio de tornillos se puede cambiar la posicion de los oculares en su plano, ya lateralmente ó bien de arriba abajo. El movimiento de los tubos oculares tiene por objeto hacer que las imágenes fotográficas ocupen los focos de las lentes.

Los monumentos, los personajes, en una palabra, todos los objetos salientes aparecen en los estereóscopos con una verdad de relieve asombrosa que ilusiona por completo. Mas, como observa Helmholtz y con razon, «la ventaja de la vision estereoscópica está en reproducir admirablemente objetos que se prestan mal á su imitacion por medio del dibujo ó de la pintura, como por ejemplo, las peñas irregulares, los témpanos de hielo, los objetos microscópicos, los animales, los bosques, etc. En particular los glaciares, con sus profundas grietas iluminadas por trasparencia al través del espesor del hielo, producen un efecto sorprendente en el estereóscopo. Una sola imágen da por lo comun la idea de una aglomeracion confusa de manchas grises, al paso que la combinacion estereoscópica hace resaltar del modo más palpable las formas de las masas de hielo, así como los efectos de la luz trasmitida y de la luz reflejada. La dificultad dimana ante todo de que unas formas tan irregulares como las de los témpanos no se pueden reproducir con nitidez, áun cuando estén sencillamente iluminadas por

la luz incidente; pero más bien debe atribuirse á que la luz trasmitida por el hielo modifica completamente las leyes ordinarias de las sombras. La representacion estereoscópica de objetos brillantes, como el agua rizada por un ligero oleaje, produce tambien efectos asombrosos». *(Optica fisiológica.)*

Se construyen estereóscopos en los cuales los rayos emanados de las dos imágenes, ántes

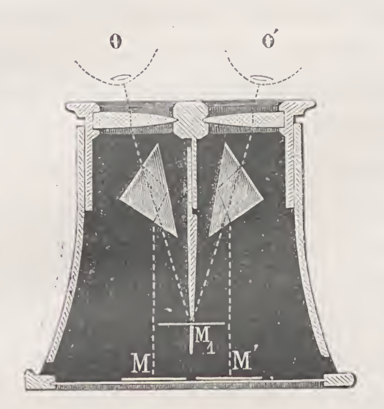



*Fig. 282.*—Seudóscopo.

de penetrar en los prismas ó lentes oculares, sufren la reflexion total al través de dos prismas en ángulo recto, cuya cara hipotenusa (figura 282) está situada paralelamente á la direccion de los rayos que llegan á ambos ojos. De esta disposicion resulta que las dos imágenes parecen simétricas de lo que son en la naturaleza; se sobreponen, pero de tal modo que la que está á la derecha se ve á la izquierda y recíprocamente. Las imágenes son pues inversas, y por consiguiente la perspectiva tambien lo es, ya por lo que hace á los relieves, ó ya á los huecos. Los objetos huecos parecen pues de relieve, y los de relieve, huecos. Sin embargo, las sombras proyectadas contrarían á veces esta ilusion, así como otras circunstancias que contribuyen no ménos que la perspectiva ó las sombras á comunicar á la vision la sensacion del relieve. Un ejemplo nos demostrará la razon de que el estereóscopo así dispuesto invierta las imágenes, y que por esta causa recibe el nombre de *pseudóscopo.*

Consideremos una pirámide truncada vista por encima y supongamos que la luz no da sombra proyectada; en este caso sólo habrá diferencia de brillo en las caras laterales. Las dos vistas estereoscópicas se deberán arreglar como lo indican los dibujos A′ y A″ y entónces producirán en el estereóscopo el efecto del relieve. Pero en el pseudóscopo los dos dibujos dan imágenes simétricas y producen el efecto que producirian las dos vistas estereoscópicas A′ y A″. Mas estas imágenes, que se sobreponen por efecto del aparato, son vistas de una pirámide semejante á la primera, alumbrada por la misma luz, pero que seria hueca en vez de ser de relieve, puesto que la cara de la izquierda es la agrandada por la perspectiva en el ojo derecho, sucediendo lo contrario con la imágen que ha de ver el izquierdo.

Prodúcese naturalmente el efecto del pseudóscopo cuando se contemplan dibujos de sombras bien marcadas, como se representan las medallas: entónces tan pronto se ve el objeto de relieve como en hueco. Creemos haber notado que se obtiene como se quiera uno de ambos efectos, si se cuida de colocar convenientemente el dibujo á la luz del dia, de modo que las sombras estén hácia el lado en que estarian en realidad, si el dibujo fuese de veras saliente en un sentido ó en otro.

## III

### APARATOS BASADOS EN LA PERSISTENCIA DE LAS IMPRESIONES LUMINOSAS

En el capítulo XVII de la Primera parte de LA LUZ hemos descrito ciertos fenómenos dimanados de la persistencia de las impresiones luminosas en la retina. Dediquemos ahora unas cuantas líneas á ciertos juguetes basados precisamente en esta persistencia, y que no dejan de servir para el estudio del fenómeno mismo.

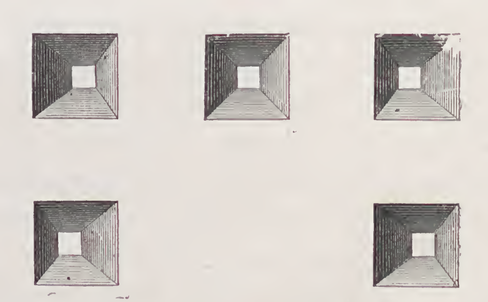


*Fig. 283.*—Vision estereoscópica directa é inversa. Relieve y hueco

El *taumatropo* es el más sencillo de todos. Consiste en un pequeño rectángulo de carton, movible al rededor de un eje que une los puntos medios de sus lados mayores, ó tambien en un disco que gira alrededor de uno de sus diámetros. En una cara del carton hay una jaula dibujada ó pintada; en la otra un pájaro pintado

tambien. Si se imprime al rectángulo un movimiento de rotacion bastante rápido, las dos imágenes persisten simultáneamente, y el pájaro parece encerrado en la jaula. Compréndese que hay mil modos de variar el experimento reuniendo y combinando toda clase de figuras. Tambien se puede hacer con dos discos perpendiculares entre sí y giratorios alrededor de su diámetro comun; en este caso, sólo se figura una de las partes del dibujo en cada una de las



*Fig. 284.*—Vision en relieve y en hueco

cuatro caras, las cuales parecerán reunidas en un sólo dibujo durante el movimiento de rotacion de los discos. Es muy sencillo hacer girar el carton; para ello se atan á los dos extremos del eje dos hebras de seda que se sujetan entre el índice y el pulgar de cada mano; y la torsion de las hebras en un mismo sentido produce la rotacion del rectángulo.

El taumatropo fué ideado por el doctor Paris.

Plateau ha dado el nombre de *fenakisticopio* (1) á un pequeño aparato cuyo juego se funda tambien en la persistencia de las impresiones luminosas.

Dicho aparato consiste en dos discos de carton fijos en un mismo eje, alrededor del cual pueden girar con igual velocidad. En la circunferencia de uno de los discos hay dibujado cierto número de figuras equidistantes. El otro disco lleva el mismo número de hendiduras equidistantes tambien, en direccion de los radios del círculo. El observador, sosteniendo el instrumento por el mango, hace girar rápidamente los dos discos, y aplica un ojo delante de las hendiduras, de modo que pueda ver al través de ellas las figuras del disco opuesto. Al pasar cada hendidura por delante del ojo, la figura del disco situada delante de él se forma en la retina; pero en virtud de la persistencia de las impresiones luminosas, el observador está viendo aún la primera figura cuando aparece la segunda, luégo la tercera, y así sucesivamente. Si todas las figuras son idénticas, claro está que la sucesion de impresiones visuales, semejantes y muy juntas todas ellas, producirá el mismo efecto que una imágen sola y permanente, en cuyo caso el objeto representado pareceria inmóvil.

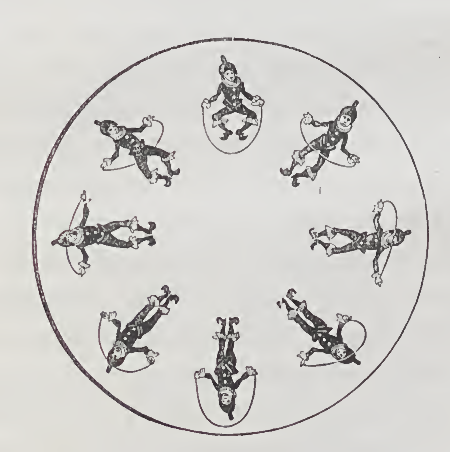


*Fig. 285.*—Disco del fenakisticopio

Pero si, por el contrario, las figuras sucesivas difieren entre sí representando varios aspectos del mismo objeto en movimiento, las sensaciones luminosas, confundidas siempre, sufrirán á la vista una modificacion continua, y el objeto representado parecerá á su vez en movimiento.

(1) Poco despues de la invencion del físico belga, el aleman Stampfer ideó un aparato muy parecido, al cual dió el nombre de *discos estroboscópicos*.

Supongamos que los dibujos representan un cuadrante ó esfera con una aguja que ocupa las posiciones sucesivas que le daria un movimiento de rotacion; la vista creeria percibir que la aguja se mueve. Si se representan, como en las figuras 285 y 286 las diferentes posiciones de una persona que salta á la cuerda, esta parecerá efectuar en realidad los movimientos cuyas fases ha marcado el dibujante.

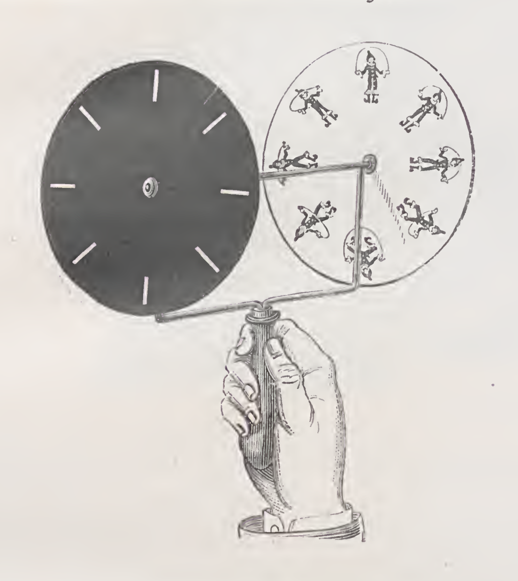


*Fig. 286.*—Fenakisticopio de doble disco

En lugar de dos discos puestos frente á frente puede bastar uno sólo; entónces se da al fenakisticopio la forma que indican las figuras 287 y 288, y que consiste en una varilla acodada dos veces en ángulo recto *tg*, provista de un mango *m*, la cual lleva el eje *ab*, que puede girar sobre sí mismo con rapidez. Se quita el tornillo *v* y se introduce por su centro el disco de carton que se fija contra el apoyo por medio del mismo tornillo convenientemente apretado.

El disco de carton tiene á la vez las figuras trazadas en los sectores y las hendiduras correspondientes practicadas en su circunferencia. El observador se sitúa entónces delante de un espejo con el instrumento sujeto por su mango, y fijando la vista á la altura de la hendidura superior, mira en el espejo las figuras del disco reflejadas en él. Imprimiendo entónces por medio del boton *p* un rápido movimiento de rotacion al disco, se reproducen los fenómenos ya descritos.

Hemos supuesto hasta aquí que el número de figuras era igual al de discos. Si fuese mayor ó menor, entónces las figuras, aparte de sus trasformaciones, pareceria moverse en la circunferencia, en el mismo sentido que el disco, ó en el contrario. Es fácil comprender este fenómeno. Supongamos, por ejemplo, que haya nueve figuras y sólo ocho hendiduras. Cuando la segunda de estas pasa por delante del ojo, el disco ha girado un ángulo igual á la octava parte de la circunferencia, y la segunda figura no dista de aquel más que un ángulo igual á la diferencia entre un octavo y un noveno; la vista se inclina á identificarla con la figura precedente, y el objeto parece haber avanzado el mismo ángulo.

Se da tambien otra figura al fenakisticopio: la de un cilindro hueco que gira alrededor de un pié montado en el eje de un cilindro (fig. 289). Las hendiduras están practicadas en el borde superior de una especie de vasija y los dibujos pegados debajo de ellas, pudiendo iluminarlos por trasparencia. Como se ha hecho uso de un aparato de esta clase para reproducir los movimientos de los animales, por ejemplo, los del caballo al paso, al trote y al galope, se le da tambien el nombre de *zootropo*.

Para que todos estos aparatos produzcan ilusion por efecto de la persistencia de la impresion luminosa, es menester que los dibujos que representan el objeto en movimiento estén hábilmente combinados, de modo que representen las fases verdaderas, los cambios que sufre el objeto á consecuencia del movimiento mismo. Más adelante veremos los servicios que ha podido prestar por este concepto la fotografía instantánea, suministrando series de imágenes de irreprochable fidelidad, y cómo lo que en un principio no era más que un juguete ha llegado á convertirse en un precioso medio de estudios.

# CAPÍTULO VI

## FOTOGRAFIA

### I

PRIMEROS ENSAYOS PARA FIJAR LAS IMÁGENES DE LA CÁMARA OSCURA. — DESCUBRIMIENTOS DE NIEPCE Y DE DAGUERRE.

Cuando se reciben en una pantalla blanca, situada en el foco de la lente convergente de la *cámara oscura*, los rayos luminosos emanados de los objetos exteriores, se forma segun

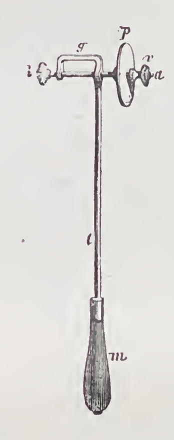


*Fig. 287.*—Fenakisticopio

hemos visto una imágen maravillosamente fiel de estos objetos; es un verdadero cuadro en miniatura del paisaje que se tiene á la vista, con todos sus matices de coloracion y de luz, y los detalles más minuciosos; pero es una imágen fugaz, ideal si se nos permite la calificacion, ó mejor dicho, toda la realidad de esta mágen consiste en el movimiento de las ondas luminosas, segun las leyes de su propagacion al través de los diversos medios que separan nuestra retina de los objetos mismos. Ciérrese la abertura que da paso á dichas ondas y al punto desaparece la imágen.

Más de un observador, desde Porta, inventor de la cámara oscura, hasta Niepce y Daguerre, inventores de la fotografía, han debido concebir el deseo de retener y fijar en la pantalla esas imágenes tan exactas, y de tener por colaboradora, en el arte de la pintura ó del dibujo á la naturaleza misma. ¿Qué se necesiba para conseguir tal resultado? Conocer otra propiedad de la luz, la que los rayos luminosos poseen de impresionar químicamente ciertas sustancias, de dejar en su superficie una huella visible de su accion, la cual suele ser tanto más viva cuanto mayor la intensidad de los rayos luminosos. Verdad es que Scheele habia ya descubierto en 1770 la propiedad que tiene el cloruro de plata de ennegrecerse á la luz, ó más bien, habia estudiado de nuevo esta propiedad conocida de los antiguos alquimistas. Tambien habia reconocido que dicha sustancia era más sensible á la accion de los rayos azules (los más refrangibles del espectro) que á la de los rojos ó amarillos. Utilizando sin duda esta

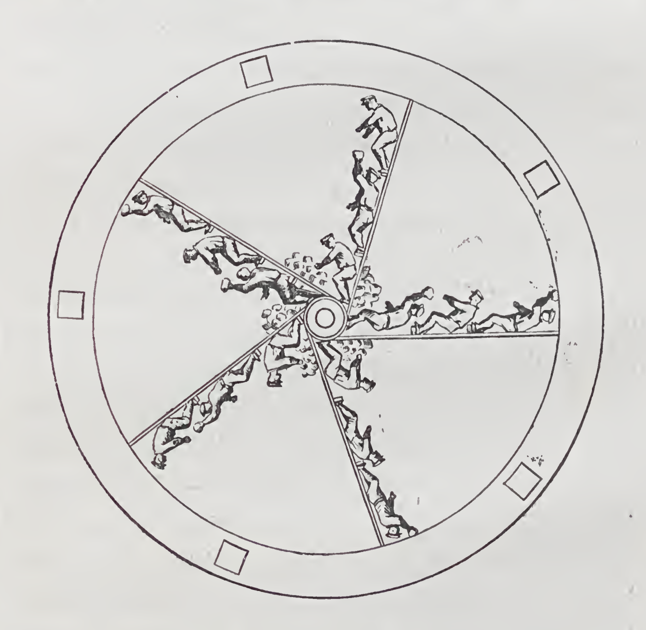


*Fig. 288.*—Disco del fenakisticopio

propiedad á principios de este siglo el hábil físico francés Charles, consiguió estampar siluetas obtenidas por la accion luminosa que enseñaba en su cátedra. ¿Cómo las producia? Se ignora; pero el procedimiento de que se valia debia de tener cierta analogía con el que Arago describe en los términos siguientes, y con el cual se pueden sacar pruebas negativas de un grabado:

«Póngase un grabado sobre un papel impregnado de cloruro de plata y expóngase todo á la luz solar, estando el grabado encima. Los trazos negros del grabado interceptarán los rayos: las partes correspondientes de la capa clorurada ó sea la que dichos trazos tocan y cubren, conservarán su blancura primitiva. Por el contrario, allí donde el agua fuerte ó el buril no han llegado, donde el papel ha conservado

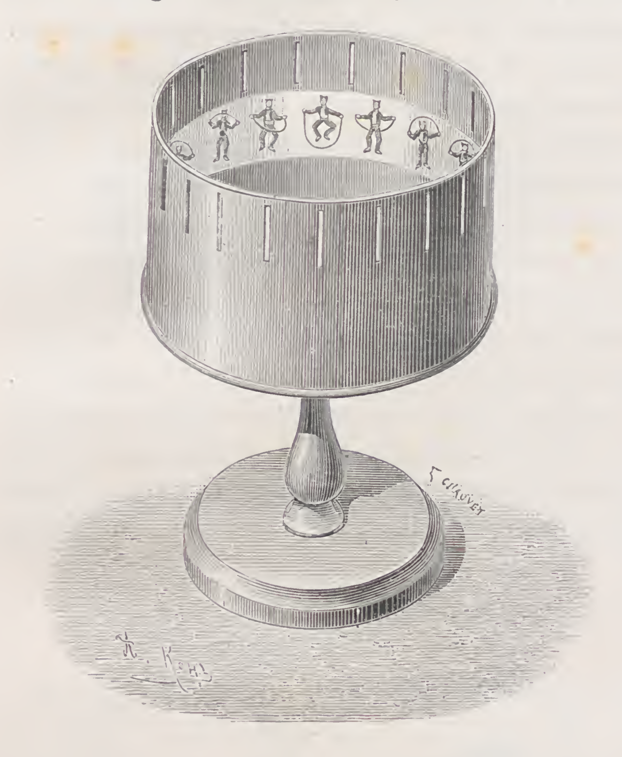


*Fig. 289.*—Zootropo

su semi-diafanidad, la luz solar pasará ennegreciendo la capa salina. La operacion dará, pues, por resultado una imágen semejante al grabado por la forma, pero inversa en cuanto á las tintas; el blanco saldrá negro y recíprocamente.»

Por desgracia, no se hubieran podido conservar á la luz estas siluetas negativas, como sucedia con las de Charles, porque ejerciendo su accion aquella en las partes no atacadas al principio, habria acabado por cubrir la hoja clorurada de un color negro uniforme.

Wedgwood consiguió reproducir en 1802, en pieles ó papeles dados de nitrato de plata, las pinturas de los ventanales de iglesia, así como copiar grabados; pero no creyó posible aplicar su procedimiento á la aplicacion de las imágenes de la cámara oscura. Hácia la misma época, H. Davy logró sacar imágenes de objetos diminutos colocándolos á corta distancia de la lente del microscopio solar.

Por lo demás estas tentativas eran incompletas, por cuanto ni Wedgwood ni Davy dieron con el medio de fijar las imágenes obtenidas, de impedir que desaparecieran á la luz del dia. Unos doce años despues, el francés Nicéforo Niepce, que dedicaba sus ratos de ocio á estudios científicos, abordó el problema de la reproduccion fotogénica de las imágenes de la cámara oscura. Pero tras un gran número de ensayos infructuosos, hubo de renunciar á sacar vistas naturales, monumentos ó paisajes á causa del mucho tiempo que invertian en recibir la accion luminosa las sustancias de que se valia. Hasta 1829, época de su asociacion con Daguerre, Niepce se limitó á la *copia fotográfica de grabados;* en cambio, logró fijar completamente las imágenes, problema que ni Charles, ni Wedgwood, ni H. Davy pudieron resolver. Hé aquí, en pocas líneas, en qué consistia su procedimiento.

Extendia con una muñequilla, sobre una placa de cobre plateada y muy bruñida, un barniz compuesto de betun seco de Judea disuelto en aceite de lavanda. La placa, calentada un tanto, quedaba entónces cubierta de una capa uniforme y blanquecina de barniz adherente á su superficie. En tal estado la ponia en el foco de la cámara oscura, y al cabo de un rato, aparecian en ella algunos indicios de la imágen. Para hacer más perceptibles aquellas líneas tenues, ocurriósele á Niepce la idea de meter la placa en una mezcla de aceite de lavanda y de petróleo; y en efecto, pudo notar que las regiones de la capa de barniz *que habian estado expuestas á la luz* puedaban casi intactas, al paso que las otras se disolvian rápidamente y dejaban en seguida descubierto el metal. Despues de lavar la placa con agua, se tenia la imágen formada en la cámara oscura, correspondiendo los claros á los claros y las sombras á las sombras (en una palabra, una *imágen positiva* del grabado). Los claros estaban formados por la luz difusa procedente de la materia blanquecina y sin brillo del betun; las sombras por las partes bruñidas y desnudas de la placa, pero con tal que estas partes *se reflejasen* en objetos oscuros; con tal que se las colocara en tal posicion que no pudiesen enviar *especularmente* al ojo una luz un poco viva. Las medias tintas, cuando las habia, podian resultar de la parte de barniz

que, á consecuencia de haber penetrado un tanto en ella el disolvente, se habia vuelto ménos mate que las regiones que subsistian intactas.» (Arago.)

Daguerre empezó por perfeccionar el método de Niepce; sustituyó el betun de Judea que



*Fig. 290.*—Nicéforo Niepce

este empleaba, por el ioduro de plata que se ennegrece con presteza á los rayos luminosos, con lo cual logró abreviar el tiempo que debia estar expuesta la placa á la luz; pero este tiempo era aún de muchas horas. Se comprenderá por esto que, á pesar de tales perfeccionamientos, era casi imposible obtener pruebas satisfactorias de las imágenes de la cámara oscura; pues miéntras los objetos alumbrados por el Sol proyectaban sus sombras á un lado al principio de la operacion, el astro solar, siguiendo su movimiento diurno, cambiaba de sitio en el espacio y con él las sombras proyectadas, que de la izquierda pasaban á la derecha, resultando de aquí confusion en las imágenes, cuya tinta se volvia apagada y uniforme, y cuyo relieve acababa por desaparecer.

La placa iodurada puesta en el foco de la cámara oscura recibia la impresion de la imágen, pero esta no existia sino en estado latente. Faltaba pues desarrollarla ó hacerla aparecer. Despues de hacer numerosas pruebas, Daguerre notó que el aceite de petróleo tenia la propiedad de hacer los tonos más visibles, que era lo que despues se ha llamado una sustancia *reveladora*. Por último, pronto reconoció que era preferible emplear con tal objeto los vapores de mercurio; en la placa iodurada expuesta á estos vapores é impresionada por la luz, aparecian con gran nitidez todos los claro-oscuros de la imágen formada en la cámara oscura.

Vése, pues, que si la primera idea y la gloria de la invencion de la fotografía corresponde de derecho y en una buena parte á Niepce, que no tuvo la satisfaccion de gozar de su triunfo, ni de participar con su asociado Daguerre del honor de la recompensa nacional decretada con justicia en favor de los dos inventores (1), Daguerre fué quien, por la invencion de un método original, llevó á su perfeccion el arte nuevo de reproducir por medio de la luz todos los detalles de un cuadro de la naturaleza, de un paisaje, de un retrato ó de una escena cualquiera.

Desde entónces se han introducido muchos perfeccionamientos en este método que ni siquiera se practica ya, y al cual han sustituido mil procedimientos más expeditos y ménos costosos; pero las pruebas daguerreotípicas alcanzaron desde su principio una finura, una precision jamás sobrepujadas. Por otra parte, bajo el punto de vista histórico y científico, y como aplicacion de las leyes de los fenómenos físicos, el procedimiento de Daguerre es de tal importancia que bien merece una descripcion detallada. El entusiasmo con que los sabios, los artistas y el público lo acogieron desde luégo fué muy natural y legítimo, si se tiene en cuenta los inmensos servicios que ha prestado, multiplicados más y más por los nuevos procedimientos: la geografía, todas las ciencias físicas y naturales, la etnografía, la arquitectura, y hasta las artes del dibujo y de la pintura han participado de estos servicios, que aumentan de dia en dia.

Veamos, pues, cuál era su orígen, es decir en 1839, el procedimiento de Daguerre, y cómo

(1) En julio de 1839, las cámaras votaron una ley concediendo á Daguerre y al hijo de Niepce dos pensiones vitalicias, la primera de 6,000 y la segunda de 10,000 francos por haber entregado estos al dominio público los procedimientos de fotografía de que eran inventor el uno y heredero el otro. Niepce, padre, habia muerto en 1833.

logró reproducir las imágenes de la cámara oscura con el aparato llamado á la sazon *daguerreotipo*.

## II

### DAGUERREOTIPIA Ó FOTOGRAFÍA DAGUERREOTÍPICA

Daguerre, lo propio que Niepce, se valia de una lámina de cobre plateado, del grueso de una cartulina, y dividia en cinco operaciones la serie de manipulaciones que constituian su procedimiento, cuya descripcion es la siguiente, segun los datos publicados por el inventor.

La primera operacion consistia en bruñir y limpiar la placa. Empezábase por pulir cuidadosamente la superficie plateada con una muñeca de algodon empapada en aceite de oliva y polvos finísimos de piedra pómez, y en seguida se le quitaba aquella capa grasienta con otra muñeca mojada en una solucion de agua y ácido nítrico. Luégo se calentaba mucho la placa y se la pulia de nuevo con polvos de piedra pómez, pero secos, hasta que la placa quedaba perfectamente bruñida.

En tal estado, podia ya recibir la capa sensible, segunda operacion que consistia en exponer la superficie bruñida á los vapores que se desprendian espontáneamente de algunos fragmentos de iodo. Esto se hacia en la oscuridad, y el operador juzgaba si se habia conseguido el resultado conveniente á la luz de una bujía, lo cual conocia cuando la capa de plata habia adquirido un bonito color amarillo de oro. Segun la temperatura, debia recibir dichos vapores de cinco minutos á media hora.

Preparada la placa de tal suerte, se la ponia en el foco de la cámara oscura, cuidando de que no trascurriese más de una hora entre esta tercera operacion y la anterior. Los objetos cuya imágen se queria reproducir debian estar alumbrados por la luz directa del Sol. Despues de una exposicion cuya duracion variaba con la hora del dia y con la estacion del año, y que en Paris era de 3 minutos lo ménos y de 30 á lo sumo, la accion fotogénica de la luz habia hecho su efecto. La placa, en la que aún no se veia nada y que era menester preservar del contacto de la luz, llevaba ya la impresion exacta de todos los objetos que habian contribuido á enviarle rayos luminosos.

Faltaba hacer que apareciese esta imágen oculta bajo su velo, y fijarla de un modo perenne en la placa para que nada pudiera borrarla. Hé aquí cómo procedia Daguerre á este efecto:

Metia la placa en una caja (fig. 291) y sometia la cara impresionada, con una inclinacion de 45°, á la accion de los vapores que salian de una cápsula llena de mercurio calentado á la temperatura de 60 á 75 grados centesimales. A los pocos minutos empezaba á aparecer la imágen, destacándose con progresiva claridad y precision, de lo cual se cercioraba el operador examinándola á la luz de una vela. Cuando la temperatura del mercurio habia bajado espontáneamente hasta unos 45°, la operacion quedaba terminada y la prueba llegada á su perfeccion. Entónces se la podia conservar muchos meses sin que sufriera alteracion con tal de no sacarla con frecuencia á la luz del dia.

«El objeto de la quinta operacion, dice Daguerre, consiste en quitar el iodo de la placa, pues de lo contrario, si la prueba estuviese expuesta mucho tiempo á la luz, continuaria descomponiéndose y la destruiria. ¿Era exacta esta interpretacion, científicamente considerada? Despues lo veremos. Lo cierto es que el inventor conseguia su objeto agitando la placa en una solucion caliente de sal marina, ó mejor aún en una de hiposulfito de sosa, y lavándola despues con agua muy caliente. Conocíase que esta última operacion habia salido bien cuando desaparecia hasta el menor indicio de la capa amarilla de oro. Poniendo en seguida la prueba bajo un cristal para preservar la superficie de la imágen de cualquier roce, se conservaba intacta, áun expuesta á la luz del dia.

Tal era en resúmen, y aparte de los detalles de manipulacion que carecen de interés bajo el punto de vista científico, el método inventado por Daguerre. Muy en breve recibió algunos perfeccionamientos que indicaremos someramente, despues de lo cual describiremos los métodos fotográficos que han dado al traste con la invencion primera, sin cercenar nada, así debemos confesarlo, del mérito de los dos hombres que contribuyeron con sus esfuerzos á descubrirla.

## III

### PERFECCIONAMIENTOS INTRODUCIDOS EN EL PROCEDIMIENTO DE DAGUERRE

Hemos dicho que en todas partes se acogió con gran entusiasmo el descubrimiento de Niepce y de Daguerre. Como las manipulaciones que exigia su práctica no eran muy difíciles ni muy costosas, y como por otra parte, el invento habia pasado á ser del dominio público gracias á la ley, muchísimos aficionados, industriales, artistas y sabios se pusieron á fotografiar, resultando de aquí una serie de perfeccionamientos ó modificaciones en el método primitivo. Mencionaremos tan sólo los más importantes.

Desde un principio, el principal empeño de todos, consistió en hacer la imágen todo lo más duradera posible, preservándola de la accion ulterior de la luz ó de cualquier roce. M. Dumas propuso barnizar la placa, vertiendo á este efecto en su superficie una solucion hirviendo de *una* parte de dextrina en *cinco* de agua. M. Fizeau propuso que se fijara la imágen con cloruro de oro, á cuyo fin despues de lavar cuidadosamente la placa impresionada con hiposulfito de sosa, vertia en toda su superficie una solucion mixta de cloruro de oro y de hiposulfito de sosa, y luégo calentaba la prueba por debajo á la viva luz de una lámpara, viéndose cómo se aclaraba la imágen poco á poco, y adquiria gran vigor al cabo de un minuto. La tenue capa de oro que cubria en aquel momento toda la prueba, reforzaba sus tonos y resguardaba la imágen de cualquier alteracion accidental.

Segun acabamos de ver, el procedimiento de Daguerre requeria aún una exposicion á la luz demasiado larga, un cuarto de hora por término medio. Por esto se comprenderá con cuánto motivo se afanaron los operadores por abreviar este tiempo, que, por muchos conceptos, restringia el uso del daguerreotipo. Importaba en extremo resolver este problema para poder retratar personas y animales y reproducir objetos móviles, y con tal objeto se buscaban sustancias más rápidamente impresionables que el ioduro de plata, habiéndose descubierto muchas que recibieron el nombre de *sustancias aceleradoras* porque agregaban su influencia á la del iodo.

Claudet vió en 1841 que la placa iodada, expuesta á los vapores del bromo, ganaba considerablemente en sensibilidad. La placa, despues de adquirir una tinta sonrosada por efecto de estos vapores, era de nuevo expuesta á los de iodo, hasta que su superficie tomaba un color morado. Entre las sustancias aceleradoras descubiertas despues, citaremos el cloruro de iodo, varios preparados de bromuro de iodo, de clorobromuro de iodo, y muchas soluciones conocidas con el nombre de *licor húngaro*, *licor aleman*, empleadas unas sin el auxilio del iodo, y otras despues de este último cuerpo, para ejercer su accion en la superficie de la placa plateada.

Gracias á este aumento en la sensibilidad de las sustancias impresionables, los procedimientos de *heliografía* (nombre que Niepce dió desde un principio á su método) fueron mucho más expeditos, pudiéndose ya sacar vistas, retratar en pocos segundos y hasta prescindir de los rayos directos del sol, pues bastaba la luz difusa para obtener pruebas, ménos vigorosas ciertamente, pero por esto mismo más armoniosas y artísticas. Los perfeccionamientos introducidos en la cámara oscura, en el aparato óptico, que describiremos muy luégo, han contribuido tambien á estos progresos.

Pero ántes de pasar á describir los sistemas fotográficos que han sustituido poco á poco á los de los primeros inventores, ocupémonos de la interpretacion científica, físico-química de los fenómenos que acabamos de estudiar. Nada tenemos que decir por lo que respecta á la cuestion puramente óptica de los fenómenos, por cuanto dejamos completamente explicada la formacion de las imágenes en la cámara oscura, en los capítulos consagrados á los fenómenos luminosos y á sus leyes, ó bien á los fenómenos de óptica propiamente dichos. Pero ¿qué sucede en la superficie de la placa, cómo se forman las imágenes, cómo obra la luz, y en qué consiste que las imágenes, una vez formadas, pero invisibles aún, se hagan visibles en todos sus detalles?

Hemos visto ya que la exposicion de la placa plateada á los vapores espontáneos de iodo daba un compuesto químico, el *ioduro de plata*. Este compuesto es el que extiende por la superficie primitivamente blanca del metal una tinta que varia, segun el espesor, desde

el pajizo, el amarillo de oro ó el anaranjado hasta el rojo, el azul y el morado. Digamos desde luégo que este fenómeno de coloracion no dimana del color del iodo, que es blanco, sino que es un fenómeno en que entra por mucho la interferencia de los rayos luminosos, conforme lo hemos visto en el capítulo consagrado á los colores de las láminas tenues. Dumas ha valuado el peso de la capa de ioduro formada en la superficie de una placa daguerreotípica, deduciendo de él el espesor aproximado de la capa misma. Esta apreciacion es demasiado curiosa para que la pasemos en silencio.

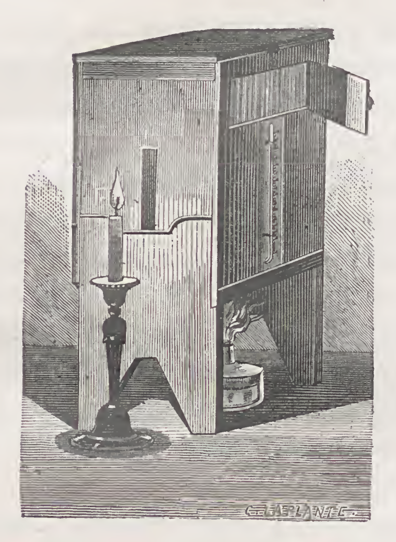


*Fig. 291.*—Caja de mercurio para la revelacion de las imágenes daguerreotípicas

«Habiendo hecho adquirir, dice el célebre químico, á una placa de 5760 milímetros cuadrados de superficie el matiz amarillo de paja mediante su exposicion al vapor de iodo, la puse en una balanza muy delicada donde la habia pesado ántes de dicha exposicion, y resultó un aumento de peso cierto, evidente, pero que apénas llegaba á medio milígramo. Cuando su color fué amarillo de oro, el aumento de peso llegó al medio milígramo. Prolongando la duracion de la accion del vapor de iodo más tiempo que el necesario, por ejemplo, cuadruplicándola, obtuve efectos bastante notables en la balanza: un aumento de peso de dos milígramos. Supuse que la cuarta parte de esta cantidad hubiera bastado para formar en la totalidad de la superficie la dosis de ioduro necesaria para producir la imágen. Pero calculando el peso de ioduro de plata que este iodo representa, así como el volúmen de ioduro que representa este peso, se llega á conocer el espesor de la capa de ioduro de plata depositado en la superficie de la placa, espesor que no es siquiera de *una millonésima de milímetro.*»

Cubierta ya la placa metálica de ioduro de plata, y tambien de bromuro despues de haber estado sometida á la accion de las sustancias aceleradoras, ¿qué sucede cuando la luz la impresiona? ¿Qué influencia ejercen las ondas luminosas en la capa sensible? Acerca de este punto, hay discordancia en las opiniones. En concepto de Dumas que emitió la suya cuando se hizo público el descubrimiento de Daguerre, la accion de la luz debe ser puramente mecánica, y su efecto el de levantar ó resquebrajar la capa de ioduro de plata, á consecuencia de lo cual el mercurio se pone en contacto con la plata metálica, miéntras que el ioduro resquebrajado continúa impermeable. Examinando con el microscopio la capa mercurial depositada despues de la tercera operacion, reconoció el célebre químico que se compone de gránulos de mercurio muy irregulares, de un diámetro igual á la 800.ª parte de un milímetro. Las partes blancas ó luminosas están cubiertas de estos gránulos; las sombras no tienen casi ninguno; las medias tintas tienen ménos que los claros; en una palabra, los gránulos de mercurio aparecen depositados en cantidades proporcionales á las erosiones del ioduro de plata.

Otros físicos suponian lo contrario. En su concepto, la accion de las ondas luminosas descomponen en parte el mercurio, trasformándolo en sub-iodoro que, puesto en contacto con el proto-ioduro de mercurio, da orígen á ioduro rojo y á mercurio metálico. Segun esta teoría, formulada en 1843 por Choiselat y Ratel, «los claros son producto de un polvillo, sumamente tenue, de amalgama de plata depositado simplemente en la placa, siendo el tono de aquellos tanto más vivo cuanto más abundante y rico en plata es dicho polvo; por lo que respecta á los oscuros, son resultado del depósito de una plata extraordinariamente dividida, mezclada mecánicamente con una escasa cantidad de mercurio procedente del lavado.»

Por lo demás, cualquiera que sea la verdadera teoría, y ya estén formados los gránulos de amalgama ó bien de mercurio metálico, su depósito sobre la superficie de la placa forma

un conjunto inestable, siendo igual en ambos casos la necesidad de preservarlos de las alteraciones exteriores. De aquí resulta la importancia de la operacion de dar fijeza á la imágen, cuya fijeza se conseguia en las pruebas daguerreotípicas, segun hemos visto, extendiendo sobre ellas una tenue capa trasparente de una sal de oro.

# CAPÍTULO VII

## FOTOGRAFIA SOBRE PAPEL Y CRISTAL

### I

### FOTOGRAFIA SOBRE PAPEL.—INVENTO DE TALBOT.—SISTEMA BLANQUARD-EVRARD

Así como los nombres de Niepce y de Daguerre van indisolublemente unidos á la primera invencion de la fotografía sobre placa metálica, así tambien los de Talbot y Blanquard-Evrard caracterizan el descubrimiento de la fotografía sobre papel: á los primeros les corresponde la gloria de haber concebido la idea; á los segundos la de haber realizado prácticamente y perfeccionado el procedimiento del inventor.



*Fig. 292.*—Fijacion de la prueba daguerreotípica, con cloruro de oro é hiposulfito de sosa

Aún no habian trascurrido dos años desde que Gay-Lussac y Francisco Arago presentaron á las Cámaras de los diputados y de los pares sus dictámenes sobre la invencion del daguerreotipo, cuando Biot leyó en la Academia de ciencias una carta de un sabio inglés, de Talbot, dando á conocer los medios que habia descubierto para reproducir directamente sobre papel las imágenes de la cámara oscura. Hé aquí en qué consistia el sistema de Talbot:

«Con una solucion de nitrato de plata en agua pura se lava una cara de una hoja de papel, haciendo en ella alguna señal para poder reconocerla, y se la deja secar. En seguida se la sumerge por espacio de dos minutos en un baño de ioduro de potasio. Luégo mezclando una solucion de nitrato de plata con otra saturada de ácido pirogálico al cual se añade un poco de ácido acético, se forma *galonitrato de plata*, con el cual se lava el papel iodurado. Sumérgese en agua el papel humedecido de esta suerte, se le seca con papel secante, y se tiene ya el papel *calotipo*. Poniéndolo en el foco de la cámara oscura, bastará un minuto para que quede impresa en él la imágen, invisible todavía, pero que aparece con todos sus detalles cuando, despues de lavar el papel con galonitrato de plata, se le somete á un calor suave. Para fijar la imágen, es preciso humedecerlo con una solucion de bromuro de potasio, lavarlo otra vez y secarlo. Los dibujos fijados de este modo son trasparentes, y se pueden sacar copias de ellos valiéndose de otra hoja de papel *calotipo* que se extiende sobre la imágen, exponiéndola así á la luz.»

En este procedimiento, volvemos á encontrar los mismos principios físicos que en los de Daguerre y Niepce. Se extiende sobre una hoja de papel una capa *sensible*, *impresionable* á la luz, y se la somete á su influencia en el foco de la cámara oscura; pero invisible aún la imágen al salir de esta, necesita la accion de una sustancia especial, de una operacion que

la *revele*, y luégo para preservarla de cualquier causa de destruccion ulterior, resta otra operacion, la de *darle fijeza*.

Todos los procedimientos sucesivos de fotografía, y por cierto que son muchos, están basados en los mismos principios y requieren las mismas operaciones fundamentales.

¿Qué progreso, pues, marcaba en el nuevo arte el procedimiento de Talbot, que en un principio daba pruebas defectuosas por muchos conceptos? Vamos á verlo. Las placas de Daguerre eran costosas, incómodas yendo de viaje, de manejo nada fácil, y necesitaban mucho tiempo para reproducir la imágen. Esta, á pesar de su admirable limpieza y de lo fino de sus detalles, tenia el defecto de que su exámen era difícil y de que no se la veia sino poniéndola á la luz de cierto modo: por último, no daba más que una prueba, siendo menester repetir la operacion tantas veces cuantas eran las copias que se querian sacar de un mismo objeto. Por todas estas consideraciones, pero sobre todo por la última, la de la reproduccion de copias con una misma prueba, el sistema de Talbot iniciaba un gran progreso en el arte de la fotografía, progreso que se ha realizado efectivamente en muy pocos años.

Primeramente el francés Blanquard-Evrard de Lila modificó el procedimiento de Talbot, logrando hacer pruebas sobre papel cada vez más perfectas, y á la par que perfeccionaba los resultados, hallaba medios de salir airoso con seguridad en sus trabajos, lo cual estaba muy léjos de suceder con el procedimiento ántes descrito. Describamos sucintamente su método.

Lo propio que el de Talbot, este método comprende dos operaciones principales: en primer lugar, se obtiene con la cámara oscura una prueba *negativa* de la imágen que se reproduce, es decir, una imágen inversa, estando figurados los claros por *negros* ó sombras, y las sombras por *claros*, y todas las medias tintas por mezclas en proporcion exacta de estos colores extremos; con esta prueba negativa se sacan pruebas *positivas* en que la imágen recobra su apariencia normal y que pueden ser tantas como se quiera.

La prueba negativa se hace sobre papel sensible, consistiendo sobre todo en la preparacion de este papel el progreso realizado por Blanquard-Evrard. En lugar de extender la capa sensible por la superficie únicamente, impregnaba todo el papel de ioduro de plata; ponia la hoja, húmeda todavía, entre dos cristales, y la colocaba así en el foco de la cámara oscura. Hé aquí, por lo demás, cómo preparaba el papel fotogénico. Escogia papel de cola, delgado, liso y bien homogéneo, poniéndolo por una de sus caras sobre una solucion de nitrato de plata, cuidando de que el líquido no mojase la otra cara, y de que el contacto se efectuase sin que se interpusiera ninguna burbuja de aire. A los pocos minutos extendia el papel sobre un cristal, con la cara húmeda hácia arriba, y lo dejaba secar en la oscuridad. Una vez seco el papel, lo sumergia en una solucion de ioduro y de bromuro de potasio, y operándose en él una doble descomposicion química, formábase á la vez ioduro y bromuro de plata, sustancias impresionables ambas que penetraban todo el espesor del papel.

Empleando el fotogénico cuando está húmedo todavía, se obtiene rápidamente la imágen, cosa indispensable principalmente para reproducir objetos animados, y en especial para hacer retratos. El papel seco requiere más tiempo de exposicion á la luz, y se hace uso de él, en viaje, para fotografiar paisajes y monumentos.

Cuando se saca el papel de la cámara oscura, no se ve nada en su superficie, como en las pruebas daguerreotípicas. Pero aquí el *revelador* es una solucion de ácido gálico ó pirogálico, en la cual se sumerge la hoja de papel. Este ácido orgánico reduce las sales de plata donde quiera que la luz ha ejercido su accion, y las partes impresionadas por ella se cubren de una tinta negra de galato de plata tanto más marcada cuanto más viva ha sido la accion de la luz. La prueba es, pues, negativa. Para que la luz no la altere, se la lava en una solucion de hiposulfito de sosa ó en un baño de bromuro de potasio, con lo cual desaparecen las sales de plata que no han sido descompuestas, y la imágen queda fija.

Con la imágen negativa hecha de este modo se sacan pruebas positivas, lo cual se consigue por un procedimiento análogo al que servia primitivamente á Niepce para copiar grabados. Se impregna de cera la prueba negativa para dar al papel diafanidad y áun trasparencia.

Basta entónces poner esta prueba sobre una hoja de papel sensible, y colocar una y otra entre dos cristales, exponiéndolas á la luz directa del Sol, ó á la difusa. La influencia de la luz hace que la hoja de papel sensible resulte impresionada bajo los blancos de la prueba negativa, de suerte que en la superficie de aquel se forma una imágen positiva, la cual es al principio invisible, pero que no tarda en aparecer merced al ácido pirogálico, lo propio que apareció la prueba primitiva.

## II

### FOTOGRAFÍA SOBRE CRISTAL ALBUMINADO

La fotografía sobre papel se popularizó con rapidez, y si en un principio eran sus pruebas mucho ménos finas que las placas daguerreotípicas, si los detalles minuciosos de las pruebas sobre metal desaparecian á causa del grano y de la textura fibrosa del papel, en cambio las nuevas imágenes eran más apreciadas por los artistas. Por lo demás, en esta segunda fase del arte fotográfico, los progresos se multiplicaron con asombrosa rapidez.

Primeramente se hicieron pruebas sobre papel encerado, gelatinado, en cuya tersa superficie se reproducian los más diminutos detalles. Pero un descubrimiento hecho por Niepce de San Víctor, sobrino de Nicéforo, imprimió á la fotografía una nueva marcha, que es la que generalmente se sigue. En lugar de valerse, como Daguerre, de una placa metálica, ó como Talbot y Blanquart-Evrard, de una hoja de papel para extender en él la capa sensible, Niepce de San Víctor logró depositar la sustancia impresionable sobre una placa de vidrio, sobre un cristal muy terso, sacando con él una prueba negativa. La trasparencia del cristal, su inalterabilidad, la tersura de su superficie, su baratura, todos estos motivos han inducido poco á poco á los fotógrafos á sustituirlo á las placas metálicas de Daguerre y al papel sensibilizado. Pero ántes de pasar á ocuparnos del sistema usado hoy generalmente, que es la fotografía sobre colodion, describamos en pocas líneas el procedimiento de Niepce de San Víctor.

La capa sensible de que cubria la placa de cristal era un líquido compuesto del modo siguiente: albúmina hecha con claras de huevos bien batidas; ioduro de potasio 1 por 100, agua 25 por 100. Despues de extender con uniformidad una capa de esta mezcla sobre el cristal, lo ponia á secar en la oscuridad, lo cual requeria casi un dia. Entónces la sumergia en una solucion de acetonitrato de plata, y tenia ya una placa apta para recibir la accion de la luz, bastando una exposicion de quince á treinta segundos en el foco de la cámara oscura.

Obtenida la prueba negativa, se sacaban pruebas positivas, como lo hemos dicho anteriormente, sobre papel, y aunque se advertia en ellas el inconveniente del grano, mediaba la diferencia considerable de que, estando exenta de él la prueba primitiva, la finura de los contornos, de los rasgos y de los matices es perfecta, y de que esta finura no sufre alteracion más que una vez en lugar de dos.

Por lo demás, tambien es fácil evitar este inconveniente sacando pruebas positivas sobre cristal albuminado, y así se hace sobre todo con las que se destinan á los estereóscopos, pues la trasparencia es una condicion para el exámen estereoscópico por la luz trasmitida.

## III

### FOTOGRAFIA SOBRE COLODION

Schœnbein descubrió en 1846 un producto que llamó sobremanera la atencion de los sabios y del público. Creyóse por un momento que esta sustancia, conocida con los nombres de *fulmicoton*, *algodon-pólvora* ó *piroxilina*, destronaria la pólvora comun. Se prepara la piroxilina de un modo muy sencillo, mojando durante medio minuto algodon cardado en ácido nítrico monohidratado, lavándolo luego con agua pura y secándolo al aire. Se disuelve en una mezcla de alcohol y éter.

Esta disolucion, empleada en cirugía y en medicina, es lo que se llama *colodion*. El fotógrafo inglés Archer consiguió en 1851 sustituir el colodion á la albúmina en la preparacion de las placas de cristal que servian para sacar pruebas negativas. El papel que desempeñan la albúmina y el colodion es el mismo, pero las fotografías hechas con el segundo necesitan ménos tiempo que con la primera y se obtienen efectos instantáneos, por decirlo así. Por lo

tanto, es posible reproducir vistas en que haya séres animados, copiar la expresion de la fisonomía en los retratos, representar cuerpos en movimiento, como las nubes impelidas por el viento, las olas de un mar agitado, los animales, etc.

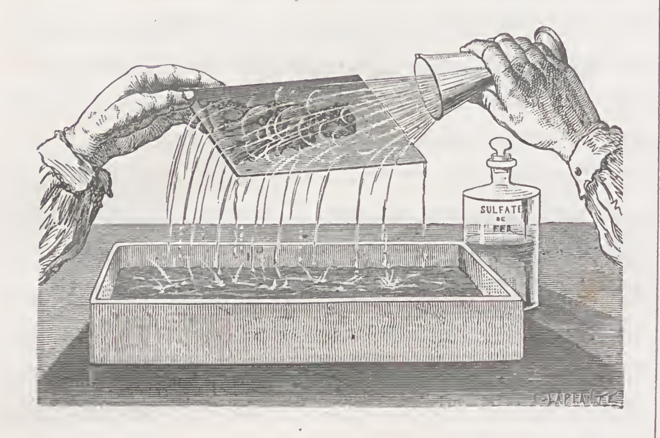



*Fig. 293.*—Aparicion de la imágen

Los procedimientos de fotografía sobre colodion se han variado de mil modos: indicando lo más esencial de uno de ellos, haremos comprender los demás, pero debemos advertir que en este sistema, lo mismo que en el daguerreotipo y que en la fotografía sobre papel y sobre cristal albuminado, hacemos caso omiso del detalle de las manipulaciones, por más que no carezca de importancia, pues con frecuencia es condicion indispensable del buen éxito. Como no nos proponemos escribir un manual, ni siquiera en extracto, de fotografía, sino dar á conocer los principios físicos de este arte tan generalizado hoy dia, el lector sabrá apreciar los motivos de nuestra reserva.

Hé aquí una fórmula de colodion normal, es decir, tal cual se le prepara ántes de mezclar las sustancias que deben contribuir á la produccion de la capa sensible:

| | |
|---|---|
| Eter sulfúrico rectificado. . . . . | 600 |
| Piroxilina. . . . . . . . . . . | 12 |
| Alcohol á 40 grados. . . . . . | 300 |

El licor iodurado es una solucion alcohólica de ioduros de potasio, cadmio, amonio y de bromuros de los mismos metales, á los que se añade un diminuto fragmento de iodo. El líquido formado con la mezcla de estas dos soluciones se extiende sobre un cristal muy limpio, como se hace con la albúmina. Poco ántes de que se seque esta capa, se sumerge rápidamente el cristal en un baño de nitrato de plata. La formacion de ioduro y bromuro de plata que de esto resulta, produce una capa de apariencia blanquecina y opaca, que es la capa fotogénica. Esta operacion se hace siempre en la oscuridad.

Entónces se pone la placa en el bastidor de la cámara oscura, y se puede ya operar, es decir, exponerla á la accion de la luz. En pocos segundos (1) se produce la impresion, y sólo resta someter la prueba á las operaciones de desarrollo y fijacion de la imágen, lo cual se consigue con una disolucion acuosa de sulfato de hierro mezclado con unas cuantas gotas de ácido pirogálico, y lavándola en seguida con hiposulfito de sosa: esta última operacion quita del negativo el excedente de nitrato de plata que de lo contrario se ennegreceria á la luz y alteraria la imágen.

Albuminando préviamente la placa ántes de extender sobre ella la capa de colodion, se puede operar muchos dias despues de la preparacion. Este es el procedimiento de Taupenot con colodion seco.

Obtenida ya la prueba negativa, se procede conforme hemos dicho para sacar pruebas positivas.

## IV

### EL APARATO OPTICO DEL FOTOGRAFO

Ahora que ya hemos dado una idea de los principales métodos de fotografía que se han sucedido desde la invencion de Niepce y Daguerre, conviene tratar de un punto comun á todos, y entrar en algunos detalles sobre el aparato óptico, es decir, sobre la disposicion de la cámara oscura con sus accesorios más esenciales.

La cámara oscura se compone de una caja rectangular de madera, que descansa sobre una tabla de rebordes salientes, y formada de dos ó tres cajones que encajan unos en otros, de modo que haciéndolos correr entre dichos rebordes, se puede alargar ó acortar en sentido horizontal una de las dimensiones de la caja.

(1) El tiempo ó el número de segundos que debe permanecer el cristal expuesto á la accion de la luz es sumamente variable, y depende de una porcion de condiciones que sólo puede apreciar el operador, de la vivacidad de la luz que da en los objetos que se han de reproducir, la calidad del colodion, los colores de los objetos, etc.

En lugar de cajas de varios compartimientos, se hace mucho uso de cámaras oscuras cuyas paredes, á modo de fuelle, se alargan ó acortan con facilidad (fig. 296).

En la cara anterior hay una abertura en la cual encaja el objetivo, es decir, el tubo AB que contiene los vidrios ó lentes que han de producir una imágen real de los objetos.

La cara posterior de la cámara oscura está hecha de modo que por una ranura puede introducirse el bastidor G en el cual se pone el papel ó la placa de cristal en la que la luz debe estampar la imágen. Pero ántes de dar acceso á la luz hasta la placa sensibilizada, es menester cerciorarse de que la imágen está á foco, lo cual efectúa el operador poniendo ante todo en el bastidor un cristal raspado en cuya superficie se pinta la imágen, pudiéndosela ver por trasparencia. Si esta imágen carece de nitidez, es prueba de que el cristal no está á foco, y entónces se corrige este defecto acercando ó retirando los cajones de la cámara oscura, segun que sea preciso acortar ó alargar la distancia para encontrar el foco exacto: esto es lo que se llama *poner á foco*, operacion semejante en todo á la que hemos indicado respecto del ocular de los instrumentos de óptica, microscopios ó telescopios.

La limpieza de la imágen depende de la bondad del objetivo, que debe ser acromático y sin la menor aberracion de esfericidad.

Las figuras 297 y 298, representan el interior de varios objetivos, unos simples y otros de vidrios combinados. Los primeros necesitan tener un diafragma de escasa abertura para evitar la aberracion de esfericidad, la cual cambiaria en la imágen las líneas rectas del natural en otras más ó ménos curvas. Siendo poca la cantidad de luz que pasa por una abertura reducida, este objetivo requiere mucho tiempo de exposicion, haciéndose uso de él más especialmente para sacar vistas de paisajes y monumentos, reproducciones de objetos inanimados, de naturalezas muertas, como se dice en estilo artístico.

En el objetivo de vidrios combinados (figura 298), cuyo diafragma está situado detrás de las lentes, se puede introducir mayor cantidad de luz, y se usa con preferencia para retratar, porque no requiere tanto tiempo de exposicion.

En el daguerreotipo, la imágen se formaba tal cual es, pero invertida, en la placa misma, y volviendo esta placa de arriba abajo para ver recta dicha imágen, resultaba ésta simétrica del objeto, es decir, todo lo de la derecha se veia á la izquierda y recíprocamente.

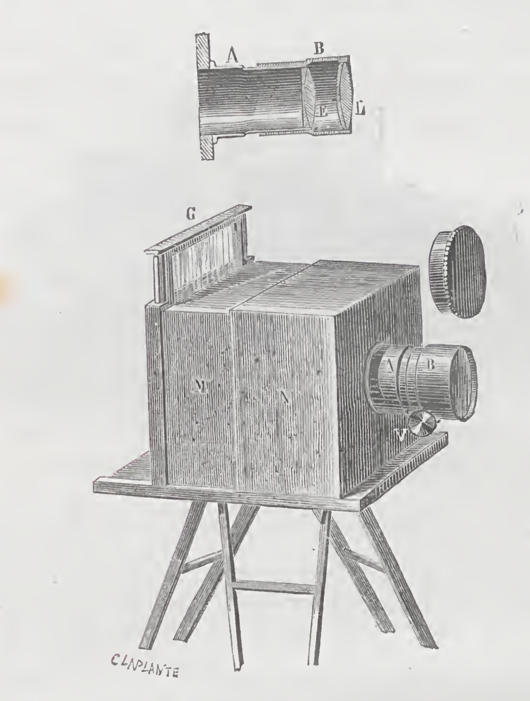



*Fig. 294.*—Cámara oscura fotográfica

Para que la imágen saliera recta, se adaptaba al objetivo un espejo inclinado 45° ó un prisma en el que se efectuaba la reflexion total sobre la cara hipotenusa. La fotografía sobre cristal no exige esta precaucion, puesto que la prueba negativa es la que resulta invertida y simétrica, y volviéndola para sacar la prueba positiva, ésta sale en su posicion normal.

Durante los primeros años que siguieron al descubrimiento de Daguerre, los observadores más hábiles veian frustrados sus esfuerzos á pesar del cuidado que ponian al hacer las varias manipulaciones que constituian el procedimiento, y muy rara vez sacaban pruebas que tuviesen la nitidez de la imágen que acababan de observar en el cristal raspado. Creyóse en un principio que esto consistia en la dificultad de hacer coincidir rigurosamente el plano de la placa con el plano deslustrado del cristal. El fotógrafo Claudet procuró remediar este último inconveniente y lo consiguió, pero el resultado fué contrario á lo que se prometia, pues las pruebas que obtuvo fueron siempre confusas, mal definidas. A fuerza de investiga-

ciones dió con la causa de este mal éxito: consistia en que el foco luminoso ó visual no coincide con el foco de los rayos químicos, con el foco fotogénico, falta de coincidencia que depende á la vez de la naturaleza de los objetivos, de la distancia de los objetos y de la intensidad de la luz.

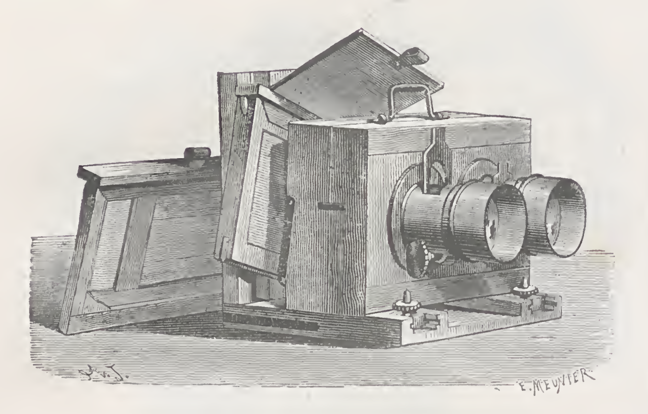


*Fig. 295.*—Cámara oscura de doble objetivo

El problema ha sido resuelto despues prácticamente por los ópticos, que construyen objetivos en los cuales el foco fotogénico coincide con el foco visual. Cuando el objetivo de un aparato no tiene esta propiedad, conviene que el fotógrafo le estudie con cuidado y que, á fuerza de probarlo, llegue á conocer la posicion en que la imágen estampada en el cristal deslustrado coincide con el foco fotogénico, de suerte que produzca en el cristal sensibilizado la imágen más perfecta posible.

Antes de terminar, debemos decir que las cualidades de un buen objetivo deben variar con el empleo á que se le destina. «El objetivo es el alma del aparato, dice M. Davanne, vicepresidente de la Sociedad francesa de Fotografía; para que fuese perfecto, deberia reunir tantas condiciones, con frecuencia opuestas, que en un solo instrumento no caben todas, por cuya razon ha sido menester crear objetivos de varias clases, segun los servicios que se habia de exigir de ellos. Para los retratos, se ha tenido que sacrificar la nitidez general y la extension del campo visual á la intensidad luminosa; para la arquitectura y la reproduccion de planos, se busca la finura, la rectitud de las líneas, la planimetría de la imágen; para el paisaje, es requisito indispensable la profundidad del foco y la extension superficial. De aquí resultan numerosas combinaciones ópticas que no siempre realiza con éxito un mismo fabricante.»

Dejamos consignado casi todo lo esencial que, desde el punto de vista científico, encierra esta interesante aplicacion de la física y de la química á las artes del dibujo. Réstanos, sin embargo, hacer mencion de una serie de descubrimientos hechos hace poco en fotografía, y que no carecen de interés para los físicos, para los sabios y para los artistas. Agregaremos á esta descripcion sucinta algunos detalles sobre la aplicacion de la fotografía misma á las ciencias y á las artes.

## V

### FOTOGRAFÍA CON LUZ ARTIFICIAL

Segun acabamos de ver, la heliografía está basada en la propiedad que tienen los rayos luminosos de modificar químicamente las sustancias llamadas impresionables ó sensibles, siendo las radiaciones químicas emanadas de la luz solar directa ó de la luz del dia, esto es, de la luz solar difusa, las que gozan de propiedades fotogénicas. Pero en caso necesario, ¿no hay otras luces más ó ménos intensas que puedan sustituir á la del Sol? Esta es una cuestion que no han tardado en plantear y resolver los físicos y los fotógrafos.

La luz eléctrica debia ser la primera en que fijaran su atencion á causa de su poderosa intensidad. Hacia ya tiempo que se conocia su

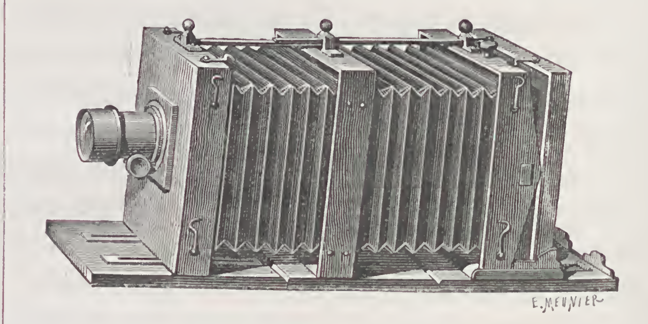
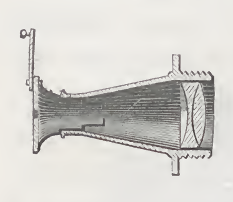


*Fig. 296.*—Aparato fotográfico de fuelle

accion colorante sobre el cloruro de plata, puesta en evidencia por Brande poco despues del descubrimiento del arco voltaico por Davy. De la Rive advirtió más adelante que ejercia cierto influjo en las placas daguerreotípicas, y sacó la imágen de un busto de yeso iluminado por la deslumbradora luz de la electricidad. La aplicacion de este foco luminoso á la fotografía ha entrado ya en el terreno de la práctica,

segun resulta de la nota siguiente que copiamos del periódico *Los Mundos:*

«M. Woodbury, de Manchester, continúa valiéndose de la luz eléctrica producida por la máquina de Wild para sacar clichés fotográficos sobre gelatina. Esta luz, excitada por las puntas de dos carbones, está rodeada por los negativos, los cuales debe atravesar para impresionar la gelatina, pudiéndose notar diariamente que los relieves sobre gelatina obtenidos con la luz eléctrica salen mucho mejor marcados que cuando se opera á la luz del Sol ó á la del dia.»



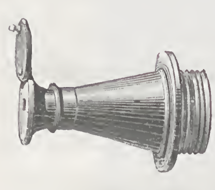


*Fig. 297.*—Objetivo simple

Como se ve, esta nota se refiere á un procedimiento de grabado heliográfico del cual diremos algo más adelante; pero lo que estampamos á continuacion es relativo á la produccion de verdaderos clichés fotográficos:

«Los Sres. Saxon y Comp.ª de Manchester, se sirven para sus amplificaciones de la luz eléctrica exclusivamente. Pudiendo disponer de una luz artificial que brilla dia y noche, no han tenido inconveniente en comprometerse á amplificar en veinticuatro horas los clichés negativos que se les confien.»

Con todo, esta luz es costosa. En los casos, muy raros por cierto, en que pueda ser necesario hacer *fotografías de noche*, se prefiere con mucho la luz del magnesio á la eléctrica. Gracias á la invencion de las lámparas de magnesio por sir David Brewster y al perfeccionamiento que M. Le Roux ha introducido en ellas asociando el zinc al magnesio, se ha podido emplear esta luz para fotografiar. Se ha empezado por reproducir grabados, bustos y estatuas, y de este modo se ha reconocido el valor fotogénico de la luz de magnesio, bastante ménos costosa que la eléctrica.

Por este medio se ha logrado reproducir ventajosamente los objetos inanimados; pero, desde el punto de vista científico, el efecto es poco satisfactorio, á causa del contraste forzosamente exagerado de las luces y de las sombras: los retratos fotográficos hechos con luz de magnesio tienen un aspecto, por decirlo así, cadavérico. En cambio se han obtenido imágenes de objetos imposibles de fotografiar, por ejemplo el interior de una de las pirámides de Egipto, el de las célebres cavernas de Kentucky conocidas con el nombre de *Mammuth-caves*, habiéndose podido reproducir con la mayor fidelidad las magníficas estalactitas de esas rocas subterráneas. Tambien se ha hecho uso de este sistema de alumbrado y de sus propiedades fotogénicas para copiar fotográficamente los subterráneos curiosos, como las catacumbas de Roma y las de Paris.

Asimismo se han hecho análogos ensayos con otras luces artificiales, que han dado buenos resultados hasta cierto punto: como por ejemplo las producidas por un chorro de gas oxihídrico proyectado con el soplete sobre materias refractarias, como cal, magnesia, circonio, cromo, etc. Van Monckhoven ha obtenido pruebas amplificadas sobre colodion ó sobre papel en un espacio de tiempo que varía de uno á tres minutos, empleando la luz del soplete de gas proyectada sobre una mezcla de ácido titánico, magnesia y carbonato de magnesia. Por lo demás, lo más favorable para la reproduccion no consiste tanto en la intensidad luminosa del foco, como en la cantidad de los rayos emitidos por ella.

## VI

### PRUEBAS AMPLIFICADAS.—FOTOGRAFÍA MICROSCÓPICA

Compréndese que proyectando con un microscopio solar en una pantalla sensibilizada la imágen de una prueba fotográfica, todos los detalles agrandados de esta prueba se formarán en la pantalla. Si se ha operado con un

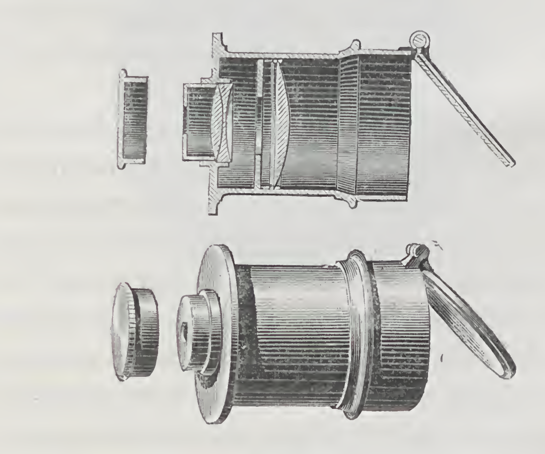


*Fig. 298.*—Objetivo compuesto

negativo, resultará una prueba positiva, pero tambien se puede obtener un cliché negativo asimismo amplificado, y sacar con él tantas pruebas positivas como se quiera por el método ordinario; este último método es mucho más expedito, consistiendo en lo siguiente:

Con el cliché negativo hecho en la cámara oscura, se saca primeramente un cliché positivo de las mismas dimensiones: en seguida se somete éste á la amplificacion del microscopio solar, de suerte que la prueba amplificada resulta entónces negativa. Claro está que esta

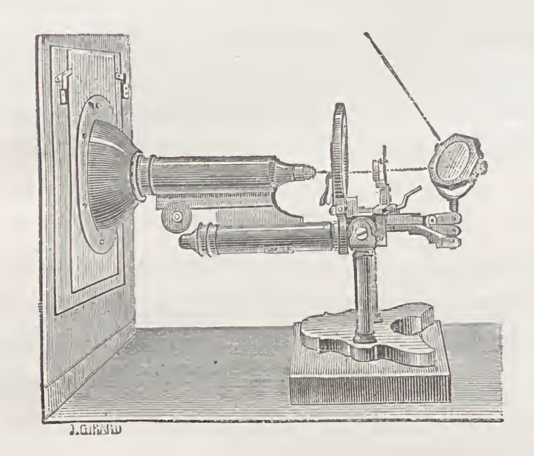


*Fig. 299.*—Microscopio adaptado á la cámara oscura para la fotografía

prueba se hace en un cristal colodionado, que se ha sensibilizado por los medios ya conocidos. Cuando se ha revelado y fijado esta prueba negativa, agrandada hasta las dimensiones apetecidas, se tiran con ella las pruebas positivas. De este modo no hay que emplear más que una vez el aparato óptico de amplificacion, lo cual explica la mayor rapidez de este método.

La dificultad en la amplificacion de las pruebas fotográficas consiste en sacar rápidamente pruebas limpias, sin que se deformen y que conserven el vigor de tonos de las pruebas hechas en la cámara oscura. En un principio, las fotografías amplificadas dejaban mucho que desear por todos conceptos; pero á fuerza de ensayos se ha llegado á perfeccionarlas notablemente, Más adelante veremos que este método, aplicado á la astronomía, ha dado sorprendentes resultados en manos de operadores ilustrados y hábiles.

Compréndese la importancia de este procedimiento, no tanto para las vistas ordinarias y para los retratos, como para la reproduccion de objetos cuyos múltiples detalles escapan al lápiz del más diestro y minucioso dibujante. El deseo que mostraba Arago al emitir su dictámen sobre el invento de Daguerre, de ver el fiel traslado de los millares de jeroglíficos que adornan los monumentos del antiguo Egipto, se ha realizado hoy, gracias al sistema de amplificacion de las pruebas fotográficas.

Si la imágen, de algunos centímetros de diámetro, de un astro como la Luna, puede trasformarse así en una fotografía de un metro y más, permitiendo estudiar detenidamente la configuracion orográfica de nuestro satélite, ¡cuánto más precioso no será dicho método al reproducir los millares de imágenes de objetos naturales que por su pequeñez son casi invisibles! Para obtener este resultado, era preciso poder sacar fotografías perfectas de esos séres infinitamente pequeños, progreso que tambien se ha realizado y del cual ha resultado una rama nueva del arte inventado por Niepce y Daguerre: la *fotografía microscópica.*

A M. Bersch se debe en gran parte este nuevo paso, por cuanto este sabio ha inventado los instrumentos ópticos necesarios para sacar imágenes microscópicas así como su amplificacion ulterior y las disposiciones que se han de tomar para las varias operaciones que dicha reproduccion exige. Otros han contribuido á perfeccionar estos procedimientos y á obtener fotografías de gran perfeccion, y entre ellos citaremos á Neyt de Bruselas, Dagron, Moitessier, Lackerbauer y J. Girard de Francia. Todo el mundo conoce esas maravillosas é imperceptibles fotografías, tamañas como una cabeza de alfiler, que, engastadas en una sortija ó en un dije cualquiera, se ven con una lente como si tuvieran las dimensiones de las fotografías ordinarias: retratos, vistas, monumentos, etc. Adaptados estos diminutos objetos á la clase de anteojo que hemos descrito (pág. 222) con el nombre de *anteojo Stanhope*, llevan consigo el microscopio merced al cual se les puede ver agrandados y con todos sus detalles. Un punto apénas perceptible se convierte en la página entera de un libro que se puede leer con la misma facilidad que en el original. Tan precioso invento es obra de M. Dagron.

Con todo, esto no pasa de ser un objeto de

pura curiosidad, de capricho; pero la fotografía microscópica no se ha limitado á esas miniaturas de utilidad discutible, sino que se la ha aplicado á reproducciones útiles, habiendo encontrado ancho campo en que prestar verdaderos servicios en la micrografía zoológica y vegetal.

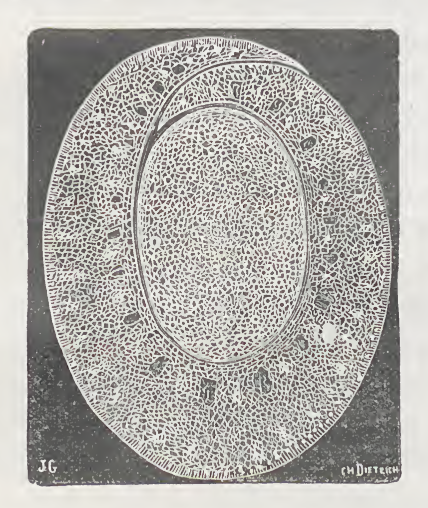


*Fig. 300.*—Estudios de fotomicrografía vegetal. Corte diametral de un tallo de *Canna indica*

«La fotomicrografía, dice J. Girard, es un método iconográfico admirable, merced al cual el sabio conserva el testimonio innegable de sus descubrimientos, y que reproduce sin desfigurarlas las maravillas de delicadeza de las encantadoras composiciones de la naturaleza. Es interesante en alto grado, puesto que reune el arte ameno de la fotografía con el más atractivo de los instrumentos de óptica. Con un microscopio ordinario y aparatos fotográficos elementales se pueden sacar imágenes microscópicas; para los trabajos de micrografía superior se requiere mayor lujo de instalacion. El sistema más sencillo consiste en adaptar el microscopio á una cámara oscura desprovista de objetivo, poniendo en lugar de este una pieza suplementaria de cautchuc (fig. 299), que sirve para unir el microscopio con la cámara oscura. Todo ello se coloca sobre una mesa, y junto á una ventana por donde penetren los rayos del Sol. Por medio del reflector, se ilumina fuertemente el instrumento y la imágen del objeto se proyecta en el cristal deslustrado de la cámara oscura. Las demás operaciones fotográficas son idénticas á las usadas generalmente.» *(Las plantas estudiadas con el microscopio.)*

Al presentar M. Girard á la Academia de ciencias fotografías microscópicas de diatomeas hechas con varios aumentos, se expresaba como sigue acerca de los medios empleados por él: «Estos medios son idénticos á los de la fotografía comun, con la única diferencia de que el objetivo está reemplazado por otro muy pequeño, alumbrado por la luz solar reflejada mediante un espejo plano ó cóncavo, segun las circunstancias. Para dar á esta luz las cualidades fotogénicas necesarias, es indispensable corregirla interponiendo al efecto un vidrio azulado. Si no tiene la intensidad suficiente, como cuando se hace uso de objetivos fuertes cuya lente frontal apénas tiene un milímetro de diámetro, entónces se ha de recurrir á un condensador.»

«La fotomicrografía, añade este sabio, es un medio exactísimo para reconocer esos séres infinitamente pequeños de más difícil distincion; la imágen obtenida da á comprender de un modo irrefutable todo el valor óptico del microscopio, y además permite apreciar los diferentes efectos de luz que de otro modo no se podrian percibir, observándose á menudo la interferencia y la difraccion en algunas diatomeas mediante notables combinaciones.»

El mismo autor ha hecho otra aplicacion no ménos interesante de la fotografía microscópica estudiando por medio de la luz polarizada los cristales de ciertas sales.

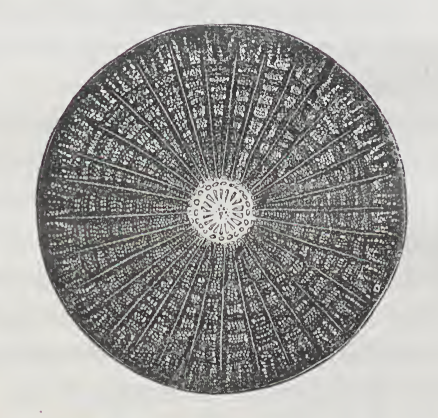


*Fig. 301.*—Estudios de fotomicrografía vegetal. Una diatomea

Esta rama de dicho arte presta servicios no ménos valiosos á la medicina y á la fisiología. El doctor Ozanam ha ideado un aparato que anota fotográficamente los latidos del pulso con todas sus fases, resultando una línea ondulada que, despues de amplificada, presenta todas las variaciones que pueden ocurrir en las pul-

saciones durante el breve intervalo de la cienmilésima parte de un segundo.

En resúmen, los innumerables descubrimientos que merced al microscopio se han hecho en el terreno de las ciencias naturales, tienen digno complemento en la fotografía que, mediante la amplificacion de las pruebas de ellos obtenidas, permite estudiarlos de un modo permanente.

Durante el sitio de Paris por los alemanes, prestó la fotografía microscópica servicios de otra índole. Gracias á ella, se pudo reducir á una superficie de algunos centímetros cuadrados los despachos más largos y voluminosos, que las palomas viajeras llevaban debajo de sus alas, de las provincias á Paris. La organizacion de este correo microscópico inicióse en Tours bajo la direccion de M. Blaise, fotógrafo de dicha ciudad. Al principio se sacaban sobre papel las pruebas reducidas de tal suerte; pero el grano del papel perjudicaba la finura del texto, y además el tiempo de exposicion á la luz era muy largo, sobre todo en invierno. Por estas razones se dió la preferencia al sistema propuesto por M. Dagron, que á fines de noviembre de 1870 fué enviado de Paris á Tours en globo. Este fotógrafo reproducia los despachos en tenues películas de colodion muy ligeras y bastante sensibles para no necesitar más que dos segundos de exposicion en vez de dos horas. Hé aquí algunos detalles acerca de este asunto, tomados de un folleto publicado por M. Dagron:

«Cada película era la reproduccion de doce ó diez y seis páginas en folio, conteniendo por término medio, segun el tipo empleado, tres mil despachos. El leve peso de estas películas permitió á la administracion cargar á una sola paloma con diez y ocho ejemplares, dando un total de más de cincuenta mil despachos que pesaban en junto *ménos de medio gramo.* Toda la serie de despachos oficiales y privados que hemos hecho durante el asedio de Paris, en número de ciento quince mil, representaba *un peso total de un gramo.* Una sola paloma hubiera podido llevarlos. Si multiplicamos ahora el número de despachos por el de ejemplares sacados, resultará que hemos hecho más de dos millones quinientos mil despachos durante los dos meses peores del año.

»Se metian las películas enrolladas en un cañon de pluma que los agentes de la administracion ataban á la cola de la paloma: su gran flexibilidad y su impermeabilidad completa las hacian muy á propósito para este uso. Además, mi preparado seco reune la triple ventaja de poderse utilizar en el momento, de no producir ninguna burbuja y de no desprenderse del cristal al revelar la imágen; además es completamente seguro para emplearlo, y nada ocasionado á desperfectos como los sistemas ordinarios.»

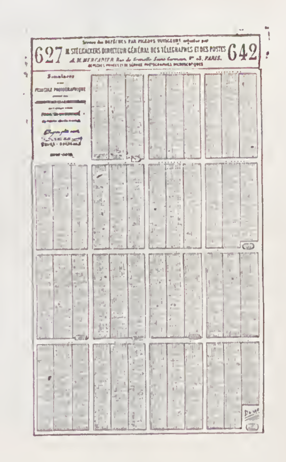



*Fig. 302.*—Fotografía microscópica. Facsímile de un despacho expedido en Paris durante el sitio.

Al llegar á Paris los despachos microscópicos se los amplificaba y proyectaba en una pantalla con un microscopio solar alumbrado con luz eléctrica, pudiéndose así copiar su contenido, pues la trasparencia de las películas facilitaba su proyeccion en la pantalla donde no costaba trabajo alguno leerlos (fig. 303).

Esta fué sin disputa una de las aplicaciones más útiles al par que ingeniosas que hayan podido hacerse de la ciencia física y del arte de la fotografía, aunque por desgracia demasiado tarde para el interés supremo de la defensa nacional.

## VII

### FOTOGRAFÍAS INSTANTÁNEAS

La rapidez de la impresion fotográfica ó la corta duracion del tiempo de exposicion á la luz, es en muchos casos una de las condiciones de éxito para el fotógrafo. Hemos visto que en la época de Daguerre, la placa sensible debia estar sometida quince minutos por lo ménos á la accion de la luz en la cámara oscura; así que entónces era imposible retratar; y las pruebas de la reproduccion de paisajes, de los árboles y, en una palabra, de todos los objetos algunas de cuyas partes se mueven y que reciben la luz de distintos modos, eran bastante imperfectas. Mas habiéndose perfeccionado los pro-

cedimientos y los aparatos de óptica, y habiéndose descubierto además sustancias impresionables de gran sensibilidad, estas dificultades se han ido allanando poco á poco.

Con todo, la rapidez de la operacion depende todavía de ciertas condiciones que no se pueden reunir siempre: es preciso que los objetos que se han de fotografiar estén iluminados por una luz muy viva; el fotógrafo debe servirse de un objetivo de gran diámetro y de movimiento rápido, y sobre todo la superficie expuesta á la accion luminosa debe ser sumamente sensible. Cuando se han llenado estos requisitos, se logran resultados que parecen asombrosos por lo que respecta á la rapidez de la impresion, y en atencion á los cuales se ha dado á las pruebas obtenidas el nombre de *fotografías instantáneas*.

Las fotografías de la superficie del Sol, que nos han dado á conocer ciertos accidentes de la foto-esfera, como las manchas, con todos los detalles de la estructura del núcleo y de las penumbras, las fáculas y finalmente los poros ó rugosidades, merecen que se las clasifique á la cabeza de esta categoría; sólo que en este caso puede decirse que, para sacarlas, la excesiva intensidad de la luz exigia la no ménos excesiva rapidez de la operacion. «La duracion de la exposicion á la luz debe ser tan corta, dice el P. Secchi, que para regularla se necesita emplear un aparato especial. Este aparato consiste en una placa metálica que corre por una ranura y que tiene una hendidura muy angosta cuya anchura se puede variar como se quiera: en el momento de la operacion se suelta un fiador; la placa obedece á la accion de un muelle, y la hendidura pasa rápidamente al través del cono luminoso.»

Sin embargo, los astrónomos más hábiles, como Warren de la Rue, Rutherford, no habian conseguido fotografiar sino los accidentes que se veian con más facilidad en la superficie del Sol, como las manchas y las fáculas. Por lo que hace á la superficie foto-esférica, tan sólo presentaba en sus pruebas un confuso veteado, sin indicar los delicados detalles de la estructura en granulaciones que ciertos observadores habian columbrado con el telescopio. M. Janssen ha sido el primero que ha logrado reproducir estos detalles por medio de la fotografía. Hé aquí, segun dicho astrónomo, las principales condiciones para esta reproduccion:

«La inferioridad de las imágenes fotográficas solares obtenidas hasta aquí, dice, consistia únicamente en las condiciones desfavorables en que se sacaban. En primer término figuran las circunstancias de duracion exagerada en la accion luminosa; y en efecto, cuando esta es demasiado prolongada relativamente á su intensidad, la imágen fotográfica se agranda rápidamente y sus contornos son confusos. Este fenómeno, al que podria llamarse *radiacion fotográfica* (sin prejuzgar su causa) es muy marcado en las fotografías de eclipses totales hechas desde 1860, en las cuales se advierte que la imágen de las protuberancias invade el disco lunar en una cantidad que asciende á 10, 15 y más segundos. Compréndese que, cuando se trata de granulaciones solares de un diámetro medio de 2 á 3 segundos, no se las puede reproducir en fotografías en que la radiacion fotográfica sea de un valor superior á sus propias dimensiones. Por esto he estudiado cuidadosamente el tiempo de la accion luminosa, para ver de allanar este obstáculo principal.....

»El tiempo de la accion luminosa, que es la condicion exclusiva de buen éxito, se ha reducido hasta $^1/_{3000}$ de segundo en verano. Se necesita un mecanismo puramente especial y muy perfecto para regular así una duracion tan corta y conseguir para las varias partes de la imágen una igualdad de accion luminosa que debe realizarse en $^1/_{10000}$ de segundo. Cuando la duracion de la accion luminosa es tan corta, la imágen está aún mucho más latente que en las circunstancias ordinarias; hay que aplicarle un desarrollo lento y terminarlo por el refuerzo con ácido pirogálico y nitrato de plata. Creo inútil añadir que se han de hacer las operaciones fotográficas con el mayor cuidado cuando se trata de imágenes destinadas á revelar tan delicados detalles; en particular, se ha de preparar el algodon pólvora á una elevada temperatura para que suministre una capa de suficiente finura. Cuando se han realizado estas condiciones, se obtienen imágenes solares que, comparadas con las antiguas, constituyen un mundo nuevo.....»

En estos últimos tiempos se ha logrado reducir bastante el tiempo de exposicion por otros

conceptos, ó mejor dicho, la duracion de la impresion, para que el objetivo del fotógrafo pueda reproducir los objetos movedizos, los animales andando y hasta los trenes de las vías férreas en marcha. Citemos algunos ejemplos.

En una conferencia que M. Davanne dió en la Sorbona en marzo de 1881, refirió los casos siguientes:

«Un aficionado muy hábil llamado Hieckel, ha hecho algunos ensayos para fotografiar al paso un tren de ferro-carril. Cuando este es un ferro-carril vecinal, de pequeña velocidad, que atraviesa el puente de Asnières y marcha á razon de 16 kilómetros por hora, se puede hacer una fotografía de él que presenta, si no una perfecta nitidez, á lo ménos un conjunto muy aceptable. En estas condiciones el tren avanza de 4 á 5 metros por segundo ó sea 0'05 por $^1/_{100}$

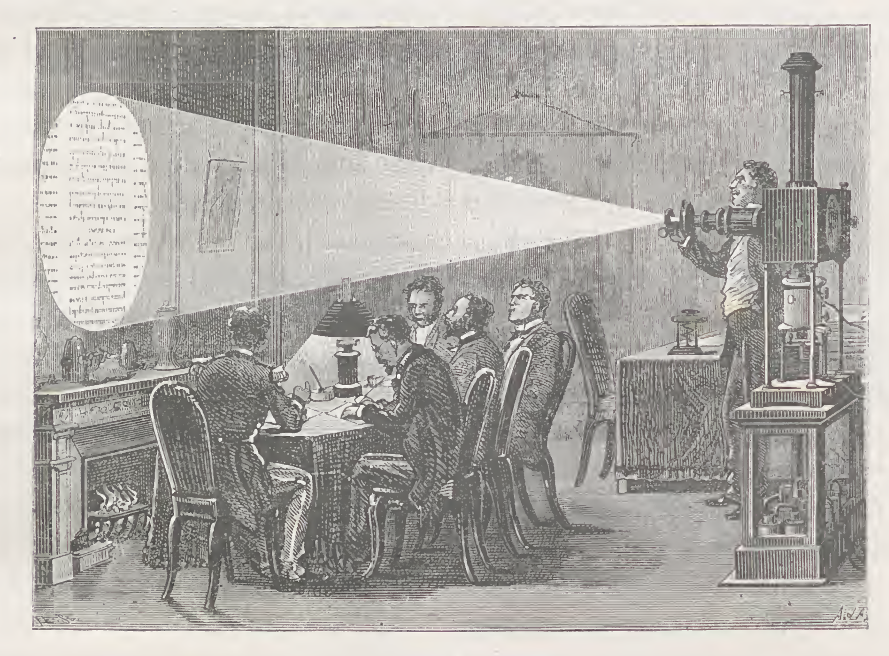


*Fig. 303.*—Amplificacion y lectura de los despachos microscópicos durante el sitio de Paris

de segundo; no es pues extraño que no se consiga dicha nitidez. No sabré deciros cuál ha sido el tiempo de exposicion de las pruebas que acabais de ver, mas á juzgar por el aspecto del cliché, de seguro que ha sido muy largo: se le hubiera podido reducir á la mitad, y si con un objetivo de diafragma más ancho se hubiese concentrado en el tren únicamente el efecto luminoso, se podia haber disminuido todavía más dicho tiempo. Entónces, y estando el tren bien iluminado y perfilándose en el cielo, se habria obtenido un conjunto suficientemente detallado.

»Se ha hecho otra prueba con el tren expreso de Rouen, que segun creo anda 60 kilómetros por hora ó sea $16^m,60$ por segundo; sólo tenemos una banda marcada en el puente, y áun se distinguen los espacios de los wagones. Sin embargo, al contemplar su aspecto general se echa de ver la extraordinaria rapidez que lleva, y que no se conoceria tanto con una prueba más marcada.»

M. Davanne cita además otros ensayos interesantes, como la reproduccion de un mar agitado, la de una niña saltando á la cuerda, etc. Cuenta, pero refiriéndose á un *se dice*, que un operador logró reproducir la imágen de cada gota de agua del chorro de una regadera, y otro la de una golondrina volando. Segun el periódico *The Enginneering*, un fotógrafo de Henley-on-Thames, cerca de Lóndres, fotografió la locomotora del expreso de Flijing Duchtman, en la línea de Great Western, y en la estacion de Tivyford, miéntras marchaba con la extraordinaria velocidad de 96 kilómetros por hora. Dicho fotógrafo reprodujo la máquina con todos sus detalles con tanta precision como los objetos inmóviles del rededor. El tiempo de exposicion fué de $^1/_{500}$ de segundo.

Los americanos Standford y Muybridge han emprendido estudios muy interesantes. Con objeto de contribuir á resolver el problema de la locomocion de los animales, problema que tan felizmente ha abordado el francés Marey por

el método de anotacion gráfica, M. Stanford pensó en valerse de la fotografía, y para ello se dirigió á M. Muybridge.

«M. Stanford, dice éste, me consultó con tal objeto y resolví secundarle en su tarea, encargándome de hacer una serie más completa de experimentos. A este fin hemos construido treinta cámaras oscuras de obturador eléctrico que deberán estar colocadas á 12 pulgadas unas de otras para fotografiar caballos. Nos proponemos reproducir todas las actitudes imaginables de atletas, caballos, bueyes, perros y otros animales cuando se estén moviendo.»

Los mismos experimentadores se proponen reproducir tambien, si es posible, el vuelo de las aves, si bien temen tropezar por esta parte con mayores dificultades que las que puedan ofrecerles los demás animales. Miéntras tanto, los resultados que han obtenido fotografiando los movimientos y pasos del caballo son sobremanera notables. En las pruebas fotográficas de M. Muybridge se ve un caballo enganchado á un tilburí y corriendo á razon de 715 metros por minuto, y otro galopando con la considerable rapidez de 1142 metros por minuto. Las otras fotografías representan al mismo caballo fotografiado á intervalos sumamente cortos de $^1/_{20}$ de segundo por el primer paso y de $^1/_{34}$ por el segundo.

# CAPÍTULO VIII

## HELIOGRABADO—FOTOLITOGRAFIA

### I

### IMPRESION CON SALES DE ORO Y PLATA, Y CON GELATINA BICROMATADA

Desde la invencion de la fotografía, todos los esfuerzos de los investigadores se han encaminado hácia la solucion de este doble problema: obtener pruebas positivas inalterables; multiplicar el número de pruebas. Y en efecto, una vez obtenido el cliché ó negativo, el objeto que se ha de lograr es la impresion. Por este concepto, lo mismo sucede con la fotografía que con los demás medios de reproduccion, como grabado, litografía y tipografía.

Dejamos ya descrito el procedimiento de impresion de las pruebas positivas mediante las sales de oro y de plata (1), así como los medios empleados para la fijacion. Este procedimiento, además de ser costoso, tiene el grave inconveniente de que se alteran con facilidad las pruebas sacadas; pero como estas son las más hermosas y agradables á la vista, son tambien las más buscadas. Verdad es que se han hecho grandes progresos por lo que á su conservacion atañe, y tanto que hoy las pruebas hechas en buenas condiciones con cloruro de oro dan imágenes que duran fácilmente quince ó veinte años, cuando quince años atrás las pruebas obtenidas por este procedimiento apénas soportaban seis meses de exposicion á la luz.

(1) El agente de esta clase de impresion es la luz, cuyas radiaciones, que ejercen, segun hemos dicho, acciones reductoras y oxidantes en ciertas sustancias, son el principio mismo de la foto-química, ó, lo que es igual si consideramos las aplicaciones de esta rama de la física, el principio de la fotografía. Completemos cuanto llevamos dicho acerca de este asunto.

La luz tiene la propiedad de descomponer ó reducir en sus elementos ciertas sales, como el nitrato de plata, los cloruros, bromuros y ioduros de los metales ménos oxidables, plata, oro, mercurio, platino, etc. Esto en cuanto á las acciones reductoras. El oxígeno y los cuerpos halógenos, iodo, bromo, etc., que propenden á abandonar los metales cuyos compuestos se hallan expuestos á la luz, tienen en iguales circunstancias cierta propension á fijarse en varias materias orgánicas y combinarse con ellas: en este caso hay oxidacion. Sobreponiéndose los efectos de estos dos modos de accion, es decir, estando sometidas á la luz las materias orgánicas impregnadas de materias salinas, la influencia de estas resulta por lo mismo activada. Pero no es menester que los dos elementos de la mezcla se hallen expuestos simultáneamente á la luz; basta que uno de ellos reciba el efecto de esta para que se produzca la imágen, pero ésta no se revela sino cuando se hace intervenir el tercer elemento. Entónces aparece la prueba negativa; por lo que respecta á la positiva, claro está que se la debe al mismo modo de accion de la luz.

Añadamos una observacion interesante, y es que por lo regular hay reciprocidad entre las sustancias impresionables y las reveladoras. Por ejemplo, si se expone primero á la luz un papel impregnado de nitrato de plata, el ácido gálico ó sulfato de hierro revelará la imágen. Pero si por el contrario se pone al sol un papel impregnado de ácido gálico, el nitrato de plata servirá en seguida de sustancia reveladora.

Hay otro sistema de impresion por la accion de la luz, que, si aún no ha alcanzado el mismo grado de perfeccion que el de los cloruros de oro ó plata, tiene en cambio la ventaja de durar un espacio de tiempo indefinido. Es el procedimiento *con carbon*, descubierto en 1852 por Poitevin, y que está basado en una propiedad notable de la gelatina (ó de cualquier otro cuerpo mucilaginoso, como albúmina, fibrina, goma arábiga, etc.), cuando se le añade un bicromato alcalino ó térreo, como el bicromato de potasa. La mezcla en partes iguales de una solucion concentrada de gelatina y de otra, concentrada tambien, de bicromato es insoluble, áun en agua caliente, si se la expone á la luz. Por consiguiente, si se hace una mezcla de los elementos de que hablamos con sustancias colorantes insolubles, como el carbon, y se extiende con uniformidad por una hoja de papel, y cuando esta se ha secado, se la pone detrás de un cliché negativo sacándolo á la luz, hé aquí lo que resulta. Todas las partes de la superficie que reciben la accion luminosa directa ó difusa se vuelven insolubles, y por tanto, si se lava el papel con agua tibia, todas las partes de la gelatina á las que no ha llegado la luz del sol se disuelven, quedando únicamente estampadas en el papel las partes iluminadas, proporcionalmente á la intensidad de la luz que ha atravesado el cliché. De este modo se obtiene una imágen de color inalterable.

El procedimiento con carbon tiene las mismas ventajas que las de la tirada de los ejemplares de un grabado que se efectúa imprimiéndolos con tinta de imprenta. La solidez de los ejemplares depende de la mezcla de gelatina en que el carbon (negro de humo) entra como materia colorante. Pero en realidad, todo el procedimiento está basado en la propiedad que tienen ciertas sustancias orgánicas (albúmina, goma, gelatina) impregnadas de bicromatos alcalinos, de recibir la impresion de la luz haciéndose insolubles. En breve nos ocuparemos de otras aplicaciones importantes del mismo.

El invento de M. Poitevin no tuvo al pronto todo el éxito que se prometia su autor; las partes más vigorosas de la imágen eran las únicas que aparecian bien: las medias tintas se disipaban, porque, como lo reconoció M. Laborde, la capa impresionada tiene muy poco espesor, y la capa de gelatina subyacente se disolvia en el agua, llevándose consigo las partes más ligeras de la imágen. El fotógrafo francés Fargier halló el medio de obviar este inconveniente, desarrollando la prueba por la parte de la gelatina opuesta á la cara impresionada. Por lo demás, el procedimiento de Poitevin ha recibido varias mejoras, ya del autor, ó bien de otros operadores é inventores.

Tal es el sistema discurrido por M. de Poitevin, que ha sido objeto de numerosos perfeccionamientos adoptados por los fotógrafos. «Las tiradas llamadas *con carbon* que dan soberbios resultados para las reproducciones artísticas, no suelen agradar tanto para los retratos. Si se las compara con las pruebas hechas con plata, parecen más pesadas y por esto no han alcanzado todavía el favor del público. Consignando M. Davanne estos resultados en su *Memoria sobre las pruebas fotográficas en la Exposicion universal de 1877*, añade que la impresion fotográfica con carbon adquiere de dia en dia mayor importancia: dice que al frente de este progreso figuran Bélgica y Suiza, y prosigue: «Pero en Francia es donde más especialmente se puede estudiar este modo de impresion en sus diferentes aplicaciones, entre las cuales debo citar en primera línea las reproducciones de obras artísticas. La facilidad con que se puede adaptar á la reproduccion las diversas sustancias colorantes, le hace superior á cualquier otro sistema para los facsímiles. Añadamos que por el hecho mismo de emplear trasportes y operaciones que son consecuencia de este procedimiento, se puede hacer uso de papeles de muchas clases, ó añadir tintas subyacentes, á las cuales da la fotografía el modelado necesario, obteniéndose así para los retratos ligeras coloraciones que amenizan el escaso vigor de las tintas monocromáticas en las amplificaciones.

Tanto en el sistema de impresion con sales de oro y plata, como en el que acabamos de describir, es la accion directa de la luz la que interviene en la tirada de pruebas, cuyo número tiene su limitacion en el precio de coste relativamente considerable. Réstanos hablar de las impresiones mecánicas, en que la luz, siquiera necesaria tambien, interviene solamente de un modo transitorio para pasar del cliché negativo

á la plancha de impresion. Una vez obtenida esta plancha, se pueden tirar mecánicamente con ella tantos ejemplares como se quiera.

Los procedimientos de impresion mecánica, derivados todos ellos del descubrimiento de A. Poitevin sobre las propiedades de la gelatina bicromatada, se dividen en muchos sistemas, conocidos con los nombres de *fotolitografía*, *heliograbado*, ó *fotograbado*, *fotogliptia* y *fototipografía*. Vamos á describir rápidamente cada uno de estos sistemas.

## II

### HELIOGRABADO Y FOTOLITOGRAFIA: PRIMEROS ENSAYOS

Acabamos de ver que, sea cualquiera el procedimiento que se emplee para fijar pruebas daguerreotípicas ó fotográficas, carecen de la solidez que ofrece la impresion ordinaria, la cual se hace con tintas grasas casi indestructibles; además, el número de ejemplares es necesariamente limitado, porque es preciso que intervenga la luz en cada uno de ellos, y así el precio de coste es bastante caro.

La tirada con carbon por el sistema Poitevin resuelve muy bien la primera de estas dificultades, pero siempre le queda cierta inferioridad comparado con la impresion tipográfica y litográfica de grabados, la de ser caro y necesitar mucho tiempo para las operaciones.

No es pues de extrañar que, ya desde un principio, se haya tratado de hacer desaparecer esta inferioridad, trasformando el cliché fotográfico en una verdadera plancha de grabado en relieve ó en talla dulce, ó de litografía. Tal es el problema que persiguió Niepce desde sus primeros trabajos y que muchos sabios y artistas han procurado resolver despues. Digamos una palabra acerca de los resultados que han conseguido y de los principales métodos inventados por ellos.

Fizeau se esforzaba ya en 1841 en reproducir por medio de la galvanoplastia las imágenes de las placas de Daguerre: el cobre depositado por la pila se moldeaba en la superficie, cuyos relieves reproducia en hueco, es decir, todos los puntos en que se hallaban diseminadas las gotitas de mercurio que formaban los claros ó blancos. Valiéndose de este molde para hacer un cliché inverso, reproducia la placa misma, restando sólo imprimir con ella por los procedimientos ordinarios de impresion de grabados. Pero desgraciadamente los relieves y los huecos eran tan poco marcados, que sólo se reproducian de este modo figuras confusas.

Entónces los señores Berres y Donné procuraron sacar planchas de las placas daguerreotípicas sirviéndose al efecto del agua fuerte.

M. Grové, reuniendo los dos métodos anteriores, hacia atacar la placa por uno de los elementos de una combinacion voltaica que obra con desigualdad sobre la plata y el mercurio.

Por último, Fizeau discurrió un procedimiento que trasformaba las placas daguerreotípicas en planchas de grabado en talla dulce. Hacia atacar en caliente la imágen por un ácido mixto compuesto con los ácidos nítrico, nitroso y clorhídrico: las partes blancas subsistian intactas, pero las negras eran atacadas y se formaba un cloruro de plata adherente cuya capa insoluble contenia la accion del ácido. Quitábase esta capa con una solucion de amoniaco, y la accion del ácido continuaba ahuecando la plancha. Finalmente, para que los huecos fuesen más profundos, Fizeau doraba las partes salientes, que de este modo quedaban al abrigo de una accion ulterior del ácido nítrico. Siendo la plata un metal poco duro y no prestándose por lo tanto á una tirada algo larga, se cobreaba la plancha por los procedimientos galvánicos (hoy se aceran las planchas de cobre).

No dejaban ciertamente de ser ensayos muy notables los que dejamos indicados; pero como la fotografía sobre papel ó sobre cristal colodionado sustituyó muy luégo al primitivo sistema de Daguerre, desistióse de toda tentativa de grabado de las placas daguerreotípicas.

Hácia 1853, Niepce de San Víctor logró hacer grabados en acero del modo siguiente: cubria la plancha que queria grabar con una capa de un barniz impresionable hecho con betun de Judea, bencina, cera y éter sulfúrico con unas cuantas gotas de lavanda: aplicaba sobre la placa seca un cliché positivo sobre papel ó sobre cristal, y lo exponia todo á la luz como para sacar una prueba. Finalmente, pa-

sando por la placa impresionada aceite de nafta mezclado con bencina, era atacada por una mezcla de ácido nítrico diluida y de alcohol. Para terminar el grabado empleaba el agua fuerte.

## III

### FOTOLITOGRAFIA: PROCEDIMIENTO DE M. POITEVIN

Entre los numerosos métodos inventados posteriormente para la tirada mecánica de pruebas fotográficas con tinta grasa, debemos hacer mencion en primer lugar del que M. Poitevin ha sacado de la propiedad de la gelatina

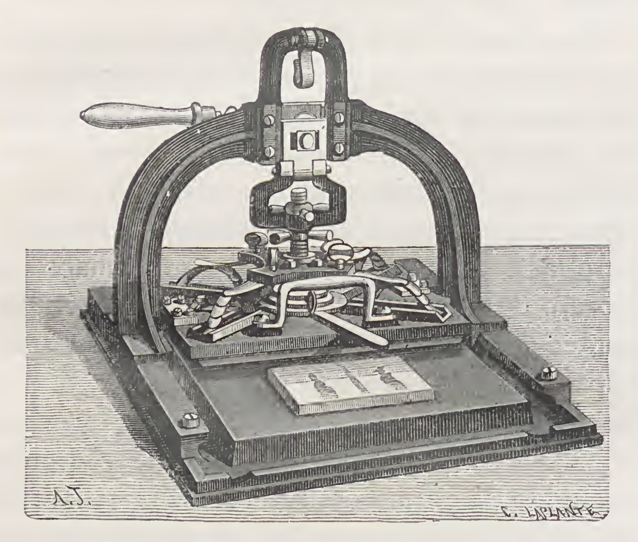


*Fig. 304.*—Prensa para la impresion fotoglíptica

bicromatada, á la que nos hemos referido más arriba. Hé aquí cómo describe el inventor su método:

«Para reproducir la contraprueba fotográfica con tinta grasa sobre papel, piedra litográfica, superficie metálica ó madera, se dan en la superficie que debe recibir la impresion una ó muchas manos de una mezcla, á volúmenes iguales, de una solucion concentrada de albúmina, fibrina, goma arábiga ó sus succedáneos, y de otra solucion concentrada de un cromato ó bicromato de base alcalina térrea ó metálica, que no precipite la materia orgánica de su disolucion. Por lo comun se emplea el bicromato de potasa; cuando éste se ha secado, ó ántes, si se ha de hacer la impresion en la cámara oscura, se le expone á la luz, hecho lo cual, se aplica á la superficie en cuestion con una muñeca ó con la prensa una capa uniforme de tinta grasa ó de color; se quita luégo esta tinta lavando la superficie, y sólo queda adherida á las partes impresionadas por la luz.»

Véase cómo procedia el mismo inventor para obtener relieves ó huecos por la sola accion de la luz, sin apelar para ello á los ácidos ni al buril, en una palabra, para sacar planchas grabadas única y exclusivamente por la luz, ya tipográficamente ó ya en talla dulce. Extendia sobre una superficie cualquiera una capa uniforme de una solucion de gelatina impregnada de bicarbonato de potasa: cuando esta capa se habia secado, ponia sobre la placa un cliché positivo ó negativo hecho fotográficamente y lo exponia todo á la accion directa ó difusa de la luz. Tambien se podia exponer la misma placa en el foco de la cámara oscura, en el caso de que se quisiera reproducir un objeto ó una vista del natural. «Despues de la impresion, se mete en agua la capa de gelatina, y entónces todas las partes que no han recibido la impresion de la luz se impregnan de líquido, la gelatina se hincha y da relieves, al paso que las partes impresionadas se humedecen poco y forman los huecos. Los relieves corresponden pues á los negros del dibujo y los huecos á los blancos.» De este modo se obtenia una plancha grabada sobre gelatina, que se trasformaba en seguida en plancha sobre cobre por el método ordinario de galvanoplastia.

Entre los procedimientos de impresion mecánica derivados del de Poitevin, haremos especial mencion del de Asser fundado en la propiedad que tiene el bicromato de potasa impresionado por la luz de tomar fácilmente y retener la tinta de imprenta, así como en la del papel sin cola de absorber fácilmente el agua por todas sus partes. Dos ingleses, el coronel James y el capitan Scott, describieron con el nombre de *fotozincografía* un medio «para hacer facsímiles fotográficos de cualquier objeto, como un manuscrito, una tarjeta, un grabado á la pluma, y trasportarlos en seguida en zinc, de modo que pudieran multiplicarse los ejemplares como los de un dibujo sobre piedra litográfica ó zinc.» Este medio, lo propio que el sistema Poitevin, está basado en las propiedades de una solucion de goma bicromatada. Tambien es el mismo sistema el que ha inspirado á M. Albert, hábil fotógrafo de Munich, un procedimiento que da notables resultados

en especial para reproducir dibujos hechos con lápiz. En las escuelas de dibujo se ven facsímiles tan exactos de las obras de los grandes maestros que se confundiria el original con las copias. Este método lleva el nombre de *Albertipia.*

## IV

### FOTOGRABADO—FOTOTIPIA

Hoy se comprenden bajo el nombre genérico de *fotograbado* (tambien se dice *heliograbado, heliografía)* todos los sistemas de impresion mecánica que tienen por objeto el hacer en placas metálicas, por medio de la accion de la luz, un grabado en hueco de la imágen de un negativo fotográfico. Estos sistemas son muchos, pero se los puede reducir á una ú otra de las dos categorías siguientes:

La primera consiste en sacar moldes de los relieves que da la fotografía hecha con gelatina bicromatada; la segunda en grabar por medio de ácidos una plancha metálica en la que la luz ha fijado los trazos formando el dibujo. Cuando se trata de reproducir un dibujo, un grabado, una imágen cualquiera formada por trazos ó tallas, líneas ó puntos, cualquiera de ambos sistemas fotográficos da buen resultado. Pero se empieza á tropezar con dificultades cuando se quiere reproducir medias tintas que se fundan ó vayan en degradacion, sombras de varias intensidades cuyo efecto no se obtiene con superposiciones de trazos, granulaciones ó líneas cruzadas. En este caso se hallan los objetos naturales, es decir los objetos reproducidos con tan gran perfeccion por las pruebas hechas con sales de oro y de plata, abstraccion hecha de los colores.

No se ha conseguido vencer esta dificultad sino auxiliando el trabajo de la luz, haciendo intervenir ciertos medios cuyo secreto no siempre han revelado sus inventores. Por lo regular los operadores cubren las tintas fundidas, obtenidas por medio de la luz, de un grano conveniente, proporcionado á la intensidad de esta. «El heliograbado de M. Dujardin, dice M. Davanne, se hace por medio de ácidos que corroen directamente las partes no preservadas de la plancha: un grano artificial, diestramente añadido, da las facilidades necesarias para la impresion. Este sistema es á la vez barato y expedito, lo cual ofrece grandes ventajas para una porcion de trabajos. Por un método que le es propio, obtiene M. Rousselon inmediatamente en la gelatina un grano proporcionado á las diversas tintas necesarias para la plancha grabada; valiéndose de la fotogliptia (de la que hablaremos pronto) y luégo de la galvanoplastia, moldea esta gelatina, y hace así un gran número de planchas grabadas que representan sobre todo la reproduccion de los numerosos cuadros que de año en año llaman más poderosamente la atencion del público (1).»

El fotograbado que acabamos de describir sucintamente no puede aplicarse sino á la tirada en talla dulce, y no á la tipográfica, lo cual requiere que los puntos ó líneas que han de recibir la tinta sean de relieve; por esta razon no se pueden imprimir estos grabados juntamente con el texto.

Por fortuna, se ha emprendido tambien este sistema de impresion fotográfica, y los *procedimientos tipofotográficos* han entrado en la práctica corriente; pero hasta ahora sólo se ha hecho uso de ellos para reproducir grabados ó dibujos que presenten los puntos necesarios para tomar la tinta. M. Davanne describe en pocas palabras el sistema de M. Guillot del modo siguiente: «Para hacer por medio de los ácidos un dibujo de relieve en una placa de metal, hay que proceder de suerte que estos la corroan varias veces, resguardando en lo posible las paredes ya ahuecadas, lo cual se consigue haciendo correr por ellas mediante un calor suave la tinta protectora de modo que esta se extienda por las paredes sin tapar el fondo.» Y á seguida añade con razon: «Creemos que el nuevo procedimiento, artísticamente considerado, es muy preferible al antiguo, y que el público no tardará en apreciarlo en todo su valor. En efecto, la fotografía, acompañada de dicho sistema, nos depara la obra del artista mismo, es un fac-símile. En cambio, el grabador en madera tiene que interpretar con líneas

(1) Nos es imposible dar aquí una idea, siquiera sucinta, de los muchos sistemas de grabado heliográfico, inventados en estos últimos años: verdad es que en su mayoría se los puede considerar derivados del procedimiento Poitevin, estando casi todos ellos basados en la impresionabilidad de la gelatina bicromatada y en la insolubilidad que la influencia de la luz comunica á esta sustancia.

y huecos regulares, pero frios, la intencion del dibujante, perdiendo en ello la obra original la mayor parte de su atractivo.»

## V

### FOTOGLIPTIA Ó SISTEMA WOODBURY

El fotógrafo inglés M. Woodbury ha inventado un curioso sistema de heliograbado, basado en el de Poitevin, y al cual designa su autor con el nombre de *impresion en relieve* ó *fotogliptia.* Despues de sacar en una hoja de palastro cubierta de gelatina bicromatada los relieves y los huecos originados por la hinchazon desigual de la gelatina impresionada por la luz, pone á secar la plancha á fuego lento. Las partes infladas ó de relieve son las sombras de la imágen. Hecho esto, M. Woodbury somete la placa de relieve poniendo sobre ella una lámina de metal (mezcla del de los caractéres de imprenta y de plomo) á la accion de una prensa hidráulica, y los relieves de la gelatina se estampan en hueco en el metal (1).

La placa metálica, ó sea el cliché así obtenido, es el que sirve para la impresion, impresion por demás original, pues consiste en verter una tinta flúida (gelatina coloreada con carbon ó de otro modo) sobre el cliché, en poner sobre la tinta el pliego de papel que se ha de imprimir y en meterlo todo en la prensa (fig. 304). Entónces el pliego de papel, prensado con una placa de vidrio, hace salir por los bordes del molde toda la tinta excedente, y sólo los huecos se llenan de ella. Tan luégo como la tinta se seca y endurece, se quita de la prensa el papel el cual se lleva adherida la capa gelatinosa coloreada. Esta forma entónces en el papel un dibujo de relieve, que dura poco tiempo, porque al secarse en dicho papel la tinta de color, se reduce su espesor en proporcion. Pero donde quiera que este espesor ó grueso era mayor, la tinta sigue siendo más fuerte y va degradando hasta el blanco, en razon inversa del grado de espesor, es decir, de la forma del molde, ó por último, segun la fuerza de las medias tintas y de las luces.

La fotogliptia no es aplicable sino á planchas reducidas, á causa de la gran presion que requiere el modo de hacer el cliché metálico. A pesar de las dificultades crecientes con que se tropieza por este concepto, los perfeccionamientos introducidos en este sistema por M. Rousselon han permitido dar mayores dimensiones á las pruebas fotoglípticas.

«Este género de impresion, dice M. Davanne, se presta admirablemente á todas las aplicaciones de la fotografía, y sobre todo á las que exigen un modelado muy fino, por lo cual se la emplea para las ediciones de retratos de personajes conocidos y para la reproduccion de cuadros.»

## VI

### HELIOCROMÍA

Digamos por último algunas palabras acerca de un problema cuya solucion no está tan adelantada como la del grabado fotográfico, á pesar de lo cual ha sido objeto de ensayos interesantes. Nos referimos á la reproduccion de los colores en las fotografías sin más intervencion que la de la luz. Hase dado á esta aplicacion particular del arte fotográfico y de la física el nombre de *heliocromía.*

Cuando se contempla en la pantalla de la cámara oscura la imágen de un paisaje reproducido en ella en miniatura, todos los objetos representados se reflejan en el foco como en un espejo, con toda la variedad de matices y colores que tienen en la naturaleza. Compréndese que se haya deseado fotografiar así una imágen tan exacta, pero ¿cómo? ¿Hay alguna sustancia sensible que no tan sólo pueda ser impresiona-

---

(1) Esta operacion parece muy singular á primera vista, y su resultado es bastante extraordinario para que nos permitamos describirla detalladamente. Que un cuño ó sello de acero deje estampada su huella en un metal más blando, sea bronce, oro ó plata, se concibe; pero no se comprende tan fácilmente cómo una sustancia como la gelatina pueda producir el mismo efecto en el metal. Esto consiste en que la gelatina endurecida es resistente en alto grado, siendo relativamente más blanda que ella la aleacion de antimonio y plomo. Efectúase la impresion mediante una fuerza considerable é instantánea, lo cual parecia imposible ántes de la invencion de la fotogliptia.

Véase cómo se procede:

Despues de secar con cloruro de calcio la hoja de gelatina en la que la luz ha estampado una imágen de relieve del cliché fotográfico, se la coloca sobre una placa de acero y se la cubre por el lado del relieve con una lámina metálica (plomo y antimonio). En seguida se somete todo á la presion de una poderosa prensa hidráulica, presion repartida por la placa y que varía con la extension de esta, aunque nunca baja de centenares de miles de kilógramos.

Sacándola en seguida de la prensa, se ve en la lámina de plomo la impresion exactísima de la imágen de la hoja de gelatina, habiendo salido los relieves en hueco con admirable fidelidad.

da de distinto modo segun el color de los rayos luminosos que caen sobre ella, sino que conserve esta impresion exacta y la ofrezca á la vista tal como la ha recibido?

Tal es el problema en toda su extension. Aún no está resuelto ni mucho ménos; sin embargo lo que se ha hecho ya acerca de este punto permite esperar que la solucion no es imposible.

Ya en 1848, Edmundo Becquerel anunció á la Academia de ciencias que habia logrado fijar en una misma capa sensible el espectro solar con todos sus colores. En la superficie de una hoja de plaqué de plata extendia una capa de cloruro sumergiéndola al efecto en una disolucion de ácido clorhídrico accionada por la pila. Cuando el color de la capa sensible adquiria por segunda vez una tinta violado-sonrosada, la sometia á la luz de un espectro obtenido con una lente. «La capa sensible se impresiona entónces de rojo en el rojo, de amarillo en el amarillo, de verde en el verde, de azul en el azul y de morado en el morado. La tinta rojiza pasa al púrpura, al rojo extremo y áun llega más allá de la raya A de Frauenhoffer; la tinta morada continúa mucho más allá de H debilitándose gradualmente. Dejando que prosiga la accion del espectro, las tintas se oscurecen y la imágen acaba por adquirir brillo metálico, desapareciendo entónces los colores.»

Los colores obtenidos de este modo se conservaban algun tiempo en la oscuridad, pero desaparecian al herirlos la luz del dia y Becquerel no consiguió fijarlos.

Cosa curiosa; la luz blanca se imprimia en negro en la placa; pero, recociendo la placa á una temperatura de 80 á 100 grados, dicha luz producia una impresion blanca.

Becquerel puso sobre la placa clorurada un grabado iluminado, y teniéndola bastante tiempo expuesta á la luz solar, obtuvo la reproduccion de los colores de la imágen; pero era preciso interponer una pantalla de sulfato de quinina para impedir la accion de los rayos ultra-morados, que habrian dado á toda la imágen un color ceniciento.

Entre las tentativas hechas con el mismo objeto que la de Becquerel, debemos hacer mencion de las de Poitevin, que ha reproducido la mayor parte de los colores del espectro, principalmente el rojo, el anaranjado y el amarillo, en un papel impregnado de una sal de plata y cubierto de una capa formada por una solucion de un bicromato alcalino, mezclada á su vez con una disolucion saturada de sulfato de cobre y otra al 5 por 100 de cloruro de potasio. El papel así preparado, expuesto 10 minutos al sol al través de una pintura sobre cristal, reprodujo los colores de esta.

Por desgracia estos resultados, que ofrecen gran interés bajo el punto de vista científico, no han podido entrar en la práctica del arte fotográfico. Los colores dados por la luz no subsisten en la placa sensible sino miéntras se los conserva en completa oscúridad; no se los puede observar sino muy de prisa, y si les da la luz del dia, se disipan al punto. Cuantos esfuerzos se han hecho hasta aquí para fijarlos han fracasado.

No pudiendo resolver íntegramente el problema, se ha apelado á otros medios. Inspirándose algunos físicos en las operaciones de la cromolitografía, han tratado de obtener separadamente los colores cuya combinacion es susceptible de reproducir los colores de los objetos. Con tres pruebas, una de las cuales dé el rojo, otra el amarillo y otra el azul, se podria por superposicion ó reunion, obtener los colores compuestos. Los fotógrafos Cros y Ducos du Hauron indicaron cada uno de por sí esta solucion.

Segun el *Anuario fotográfico* de M. Davanne, el procedimiento de M. Ducos consiste en lo siguiente:

Se hacen ante todo tres pruebas negativas una de las cuales ha de servir para el positivo rojo, otra para el amarillo y la tercera para el azul. «Para hacer el negativo azul, es preciso eliminar todos las tintas azules simples ó compuestas del objeto que se ha de reproducir para que no ejerzan accion alguna en la capa sensible: con este fin se sacará la prueba al través de un cristal rojo-anaranjado. Despues de un tiempo de exposicion que sin duda debe ser bastante largo, se obtiene una imágen en la cual el color azul y sus compuestos ejercen solamente una accion muy débil en la capa sensible, al paso que el amarillo sale muy marcado. El cliché que representa el negativo del rojo se obtiene eliminando los rayos de este color

con un cristal verde: y para el amarillo, se saca la prueba interponiendo un cristal morado.

»Cada uno de estos tres clichés sirve para hacer una prueba positiva que se puede sacar con mezclas de gelatina y bicromato de potasa añadiendo á ellas la materia colorante necesaria, ya sea una mezcla roja, ya amarilla ó bien azul. Dispuestas las superficies gelatinadas sobre soportes trasparentes, se las impresiona bajo los clichés correspondientes. El que se obtiene con el cristal azul morado se pone sobre la capa amarilla y por medio del lavado resulta una prueba monocroma amarilla; el que se saca con el cristal verde se coloca sobre la gelatina roja, y el hecho mediante la interposicion del cristal rojo-anaranjado, sobre la gelatina azul. Despues de la exposicion á la luz, desarrollo y desecacion de las imágenes, sobrepónense estas y dan la prueba polícroma, con toda la serie de las degradaciones de tintas.»

Las pruebas hechas por Ducros du Hauron demuestra que todo sucede conforme lo indican las ideas teóricas que le han inducido á formular su procedimiento. Es, como se ve, un resultado interesante, pero aún falta mucho para que el verdadero sistema de dar fijeza á los colores naturales quede resuelto.

El sistema de M. Cros no difiere en principio del que acabamos de describir: consiste en sacar tres clichés de la pintura que se quiere reproducir, el primero al través de una pantalla *verde*, el segundo al través de una *morada*, y con una *anaranjada* el tercero. Las pantallas son cubetas planas ó cristales que contengan las indicadas sustancias coloreadas. A fin de compensar el desigual poder actínico de estas luces, el inventor impregna las placas sensibles de ciertas sustancias colorantes orgánicas, como la clorofila, la cartamina y la cúrcuma. La capa sensible está constituida á su vez por un colodion que contiene 3 por 100 de bromuro de cadmio, metido en un baño de 100 partes de agua y 20 de nitrato de plata. Despues del lavado, se sumerge en una solucion de bromuro de potasio y la capa queda entónces impregnada de la sustancia orgánica.

La imágen heliocromática definitiva se obtiene en seguida tirando con los tres negativos hechos de este modo los tres colores rojo, amarillo y azul cuya superposicion debe dar las diferentes tintas coloreadas del cuadro.

# CAPÍTULO IX

## APLICACIONES DE LA FOTOGRAFIA

### I

### APLICACIONES DE LA FOTOGRAFIA A LAS ARTES Y A LAS CIENCIAS FÍSICAS Y NATURALES

Tales son, en sus caractéres más esenciales, los procedimientos de este arte nuevo, que constituye una de las aplicaciones más singulares de las leyes de la física combinadas con las de la química. Tales son los principales progresos realizados desde la época de Daguerre. Por supuesto que aquí nos hemos limitado á dar una idea de los varios métodos que constituyen la práctica fotográfica, procurando relacionarlos con los principios de la ciencia; pero no queda explicado todo cuanto se refiere á las reacciones originadas por la influencia de las ondas luminosas, incumbiendo á los físicos y químicos más bien que á los fotógrafos de profesion, por hábiles que sean, la tarea de disipar la oscuridad que todavía reina sobre este punto.

La fotografía, tal cual es, ha prestado ya eminentes servicios á las artes y á las ciencias, y áun, por más de un concepto, es á su vez un arte que exige raras cualidades de habilidad técnica por parte de cuantos lo cultivan. La eleccion de asuntos, lo mismo en los retratos que en los paisajes, el arreglo de las actitudes y posiciones, el estudio de la iluminacion más favorable para una reproduccion verdaderamente artística, suponen facultades que la educacion puede desarrollar si el sentimiento íntimo preexiste, pero de que no están dotados

todos los prácticos, por familiarizados que estén con las manipulaciones fotográficas.

Por lo que atañe á los servicios prestados por la fotografía á las artes y á las ciencias, repetimos que son incontestables. Gracias á ella, se han reproducido con irreprochable fidelidad los productos del arte en todos los países del mundo, y tanto por lo que respecta á las vistas de monumentos arquitectónicos como á las obras de escultura. Todos los objetos de relieve salen con una limpieza en sus detalles y en su conjunto, con una exactitud en el dibujo con la que apénas puede competir el grabado, y que nunca podrá sobrepujar. Por otra parte, las vistas fotográficas de esta clase son los más útiles auxiliares del dibujante, pintor ó grabador. No podemos decir otro tanto por lo que se refiere á los cuadros pintados, porque los colores de estos no ejercen la misma accion fotogénica en las sustancias impresionables; así es que los azules salen más claros, los amarillos y verdes resultan negros por lo comun, de suerte que la reproduccion de una pintura al óleo, buena por el dibujo, es por lo comun mediana en cuanto al color, pero tambien es cierto que las copias de esta clase son tan exactas que las copias pintadas jamás podrán competir con ellas en lo relativo á la fidelidad del dibujo y del conjunto (1).

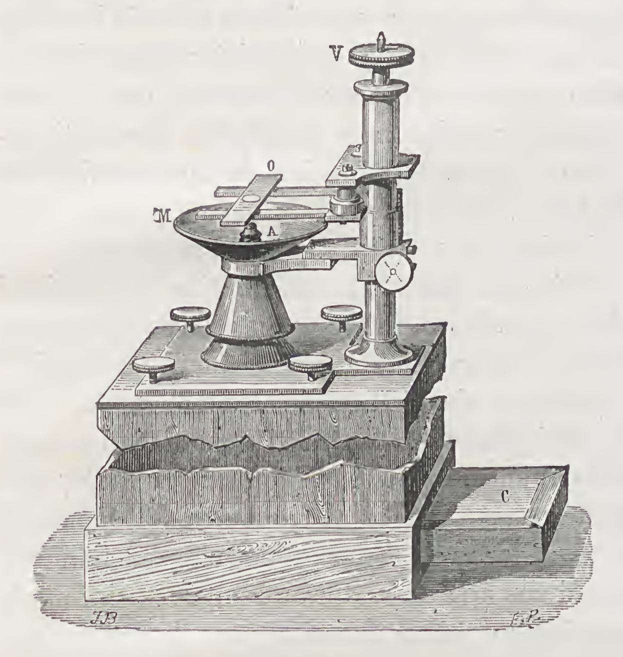



*Fig. 305.*—Microscopio fotográfico

La fotografía reproduce admirablemente los facsímiles de los grabados antiguos ó raros cuyas planchas originales se han perdido ó deteriorado, y por este concepto presta y seguirá prestando siempre á los artistas y aficionados grandes servicios.

Si pasamos ahora á las aplicaciones de la fotografía á las ciencias positivas, físicas y naturales, la cuestion es distinta que considerada desde el punto de vista puramente artístico.

La geografía, la etnología y la antropología son las primeras que se aprovechan de ella. La reproduccion de sitios pintorescos, de las montañas y su perfil, de sus disposiciones naturales, la de ciudades, monumentos, puertos, habitantes de diferentes países, y sus trajes, objetos de toda clase, utensilios, armas, etc., no tienen ya nada que temer de la poca destreza de un dibujante, de la falta de veracidad, unas veces involuntaria y otras voluntaria, de los narradores y de los viajeros, pues el procedimiento no admite exageracion alguna, ni lisonja ni rebajamiento. ¡Qué recurso tan precioso, sobre todo para los antropólogos que en lo sucesivo podrán reunir los tipos verdaderos de las razas humanas y de sus innumerables variedades!

La historia natural, la medicina, la anatomía y la fisiología no deben tener ménos interés por las aplicaciones de la fotografía á causa de los infinitos recursos que esta puede proporcionarles para sus estudios especiales. Las preparaciones que no se pueden conservar sino á costa de grandes dispendios, las anomalías vegetales ó animales ó humanas, reproducidas por la luz con sus verdaderas formas, con sus más minuciosas particularidades, multiplicadas así para los sabios, multiplicarán á su vez los asuntos de estudio, sirviendo de segura base para la discusion de los hombres de ciencia. Gracias á la fotomicrografía y á los procedimientos de amplificacion, el estudio de los tejidos animales y vegetales, el de los séres infinitamente pequeños revelados por

(1) Los artistas empiezan á apreciar todas las ventajas con que les brinda la fotografía para la vulgarizacion de sus obras, y ahora son ya muy pocos los que acuden para ello al grabado en madera. Aquel medio les proporciona en efecto muchos recursos, con una rapidez de ejecucion de que no es capaz el grabador. Así es que ahora se envian á las galerías fotográficas cuadros, dibujos á la pluma, al lápiz, al esfumino, y segun el gusto ó las intenciones del artista, salen reproducidos por los varios sistemas fotográficos. (Davanne.)

el microscopio, recibe y recibirá un socorro inmenso, por razones que juzgamos innecesario aducir. Lo que hemos dicho respecto del hombre y de las razas humanas podemos decirlo tambien de las innumerables especies animales y vegetales, que saben sin duda reproducir algunos dibujantes de rara habilidad, pero á costa de tiempo y de trabajo. Además estos dibujantes de talento son muy escasos. No es posible que cada explorador, cada viajero de cuantos cruzan por esas comarcas no exploradas, ó poco conocidas, posea ese arte difícil. Provistos en cambio de un aparato fotográfico con las sustancias convenientes, pueden reunir con muchísimo ménos tiempo y trabajo, una considerable coleccion de documentos cuyo principal mérito consistirá en la fidelidad del agente que los ha proporcionado, fidelidad que no puede ponerse en duda.

## II

### LA FOTOGRAFIA APLICADA Á LA ASTRONOMIA

La fotografía ha podido pasar de lo infinitamente pequeño á lo infinitamente grande, los fenómenos celestes no se han eximido de su accion. Se ha fotografiado el Sol y sus manchas, la Luna y sus montañas, los eclipses y las particularidades físicas que han presentado, y se han hecho ensayos fotográficos respecto de los planetas y de las constelaciones.

Todavía no podemos calcular los servicios que la astronomía puede reportar de tan maravilloso arte; pero cualquiera que sea la importancia de los que este le ha prestado ya, tal vez no siempre se ha comprendido la verdadera mision de la fotografía astronómica y la influencia que puede ejercer en los progresos de la ciencia misma. No todos los astrónomos están de acuerdo acerca de este punto, y creemos que se leerán con interés las observaciones y reservas hechas, há ya unos doce años, por un astrónomo de tanto saber y experiencia como modestia, el autor de la *Selenografía*, el venerable Mædler. Añadiremos á estas observaciones un breve resúmen de los progresos realizados por la fotografía celeste en tan corto espacio de tiempo y así podrá el lector formarse una idea del camino que resta aún por recorrer para que se realicen las esperanzas concebidas.

«La mayoría de las personas que me escuchan, dice Mædler, recordarán tal vez que inmediatamente despues del descubrimiento de la fotografía, se concibieron esperanzas únicamente comparables con las concebidas por Descartes y sus contemporáneos á raíz del descubrimiento de los anteojos astronómicos. La gente se condolia entónces de los pobres sabios que habian pasado toda su vida observando, midiendo y dibujando sin tregua ni reposo. Suponíase que no tan sólo se deberia hacer lo mismo sin trabajo y en mucho ménos tiempo, sino tambien obtener resultados mucho más exactos, mucho más detallados que antiguamente. La determinacion de la superficie de la Luna, tarea que me ha costado siete años, deberia hacerse mejor en siete segundos.

»Treinta años han trascurrido ya desde el descubrimiento de Daguerre: ¿hasta qué punto se han realizado tan ambiciosas esperanzas?

»Varren de la Rue, en Inglaterra, William Cranch Bond, en América, y otros han acometido animosamente la empresa: han adaptado poderosos anteojos astronómicos á aparatos fotográficos, y conseguido simultáneamente dar á sus aparatos, durante el corto intervalo de tiempo que se necesita para hacer los clichés, el mismo movimiento que los cuerpos celestes cuya imágen se proponian observar. De este modo se han fotografiado las diferentes fases de la Luna; pero sus detalles han sido muy inferiores á los que puede determinar un observador hábil. Bond se ha ocupado de las estrellas fijas, y disponia de un anteojo astronómico con el que podia ver estrellas de 14.ª magnitud; pero no ha podido sacar sino imágenes muy débiles, apénas visibles estrellas de 1.ª magnitud.

»Verdad es que podria citar preciosos cuadros que debemos á la fotografía astronómica; pero no son los detalles del cielo estrellado los que podremos reproducir y conservar de este modo, sino los fenómenos relativos á los objetos conocidos hace ya mucho tiempo y que reflejan una fuerte luz.

»Citaré, en primer lugar, las manchas del Sol, cuya fotografía sólo requiere una pequeñísima fraccion de segundo, y que se han reproducido con gran nitidez. Con todo, áun en esta circunstancia no se consigue fijar los de-

talles que pueden reproducir los buenos observadores acostumbrados á estos fenómenos; pero sí se obtiene una imágen del Sol para un momento determinado y, si se nos permite valernos de una expresion de sir John Herschel, se obliga al Sol á escribir su propia historia.

»Estos experimentos serán, ó hablando con más propiedad, han sido ya muy útiles, particularmente en los eclipses totales de Sol. No hay dibujante, por listo que se le suponga, que pueda hacer en dos ó tres minutos, duracion ordinaria del fenómeno, lo que Warren de la Rue ha hecho en España cuando el último eclipse de Sol, porque, suponiendo que todo esté ya preparado, se pueden hacer, no tres, sino doce ó quince fotografías de un fenómeno que tan rápidamente desaparece. Para los planetas, áun para los mayores, la fotografía no está muy en uso y nos enseñará pocas cosas nuevas. El experimento será todavía ménos útil cuando se le aplique á las estrellas. Se ha fotografiado el grupo de las Pléyades y de Orion, pudiéndose conocer bien estas constelaciones en la fotografía hecha; pero una persona de buena vista, sin necesidad de recurrir á anteojos ni telescopios, veia más cosas en el cielo de las que aquella le mostraba.

»Nos damos el parabien por el nuevo medio de estudio que muchos observatorios, entre los cuales citaremos el de Wilna, poseen de un modo completo ó poco ménos; pero sin creer á pesar de ellos que su auxilio pueda ensanchar la esfera de accion de la astronomía práctica, ni que el descubrimiento de la fotografía llegue á causar en el arte de las observaciones una revolucion tan grande como la que en él ocasionó el invento del anteojo astronómico.»

Por las fotografías publicadas á la sazon de algunas porciones de la Luna, se podia juzgar de la exactitud de las apreciaciones de Mædler, á lo ménos en la época (1868) en que dió la conferencia de la que acabamos de reproducir un fragmento; comparando un facsímile de la carta selenográfica dibujada por tan ilustrado astrónomo con una reproduccion de una hermosa fotografía lunar amplificada, hecha por Warren de la Rue, veíase que en esta el contraste de luces y sombras marcaba admirablemente el relieve de la superficie, pero sin distinguirse una porcion de detalles topográficos de sumo interés que el astrónomo, auxiliado por instrumentos de gran alcance, habia trazado con claridad y que hacen de su magnífica carta de la Luna un precioso monumento para los futuros estudios de selenografía.

Esto no obstante, gracias á los perfeccionamientos introducidos posteriormente en los aparatos se ha podido sacar fotografías de la Luna mucho más precisas, áun cuando, segun observa con razon M. Faye, no dispensen ni del auxilio de un mapa de la Luna bien hecho, como el de Beer y Mædler ó tambien el de Schmidt, ni del estudio de dicho astro por medio de poderosos telescopios. El astrónomo americano Rutherford ha hecho hermosas fotografías del disco lunar con un objetivo acromático de 13 pulgadas de diámetro, al cual iba unida una tercera lente cuya densidad y curvatura habian sido calculadas de modo que dieran al conjunto el acromatismo químico.

El objetivo de Rutherford, adaptado á un anteojo ecuatorial movido por un excelente aparato de relojería, dió un negativo de unas 4 pulgadas (101 milímetros) de diámetro, del cual se sacó una prueba positiva del mismo tamaño. El tiempo de exposicion, de un cuarto de segundo en el plenilunio, fué de dos segundos en los cuartos creciente ó menguante. Por último, expuesto el positivo en un aparato de amplificacion á la luz solar convergente, dió las magníficas fotografías de la Luna que conocen hoy todos los astrónomos y que nos hacen ver á nuestro satélite con todos los detalles de su superficie. En estas fotografías el disco no tiene ménos de 50 centímetros de diámetro. Las grandes manchas oscuras á las cuales se ha convenido en dar el nombre de *mares*, las escabrosidades de sus contornos, algunas de las cuales son tan extensas, tan escarpadas y de tanta elevacion que se designan con el nombre de *cordilleras* esa multitud de cavidades de todas dimensiones que acribillan el suelo de las regiones más brillantes de la Luna; por último, los puntos luminosos, las fajas en forma de arcos de grandes círculos que surcan la superficie, todo ello se ve con tanta claridad, con un relieve casi tan marcado como si se contemplara el astro con un telescopio. Cierto es que faltan todavía muchos detalles, los cuales aparecen con mucha exactitud

en las grandes cartas á que hemos hecho referencia, y que no se pueden ver sino con los instrumentos ópticos. Sin embargo, la excelente fotografía lunar, tal cual es, puede servir de mucho; las sombras proyectadas pueden facilitar la mediacion de alturas; el estudio de las varias formaciones de las tierras lunares, de los diversos accidentes de la superficie, de las relaciones de forma y posicion será con ella mucho más fácil y permitirá que se aborden provechosamente las cuestiones de geología comparada que interesan á la constitucion física de la Luna, siempre controvertida.

Hay una de estas cuestiones que quizás se llegue á resolver comparando las fotografías de la Luna hechas despues de mediar largos intervalos de tiempo entre una y otra; cuestion que se agitó hace algunos años con motivo de haber creido observar ciertos astrónomos algunos cambios ocurridos en un cráter situado en medio de la mancha que se llama *Mar de la Serenidad.* El cráter *Linneo*, que es al que aludimos, marcado claramente en la carta de Mædler (1837) y observado por Schmidt en 1841, pareció haber desaparecido en octubre de 1866; á lo ménos sólo quedaba de él un rastro apénas visible en medio de una mancha blanca. Esta diferencia de aspecto ¿implicaba una verdadera mudanza? ¿Habria habido, por efecto de la influencia de fuerzas físicas, volcánicas ú otras, una erupcion cuyos regueros de materias ígneas hubiesen cegado la cavidad anteriormente observada y dibujada?

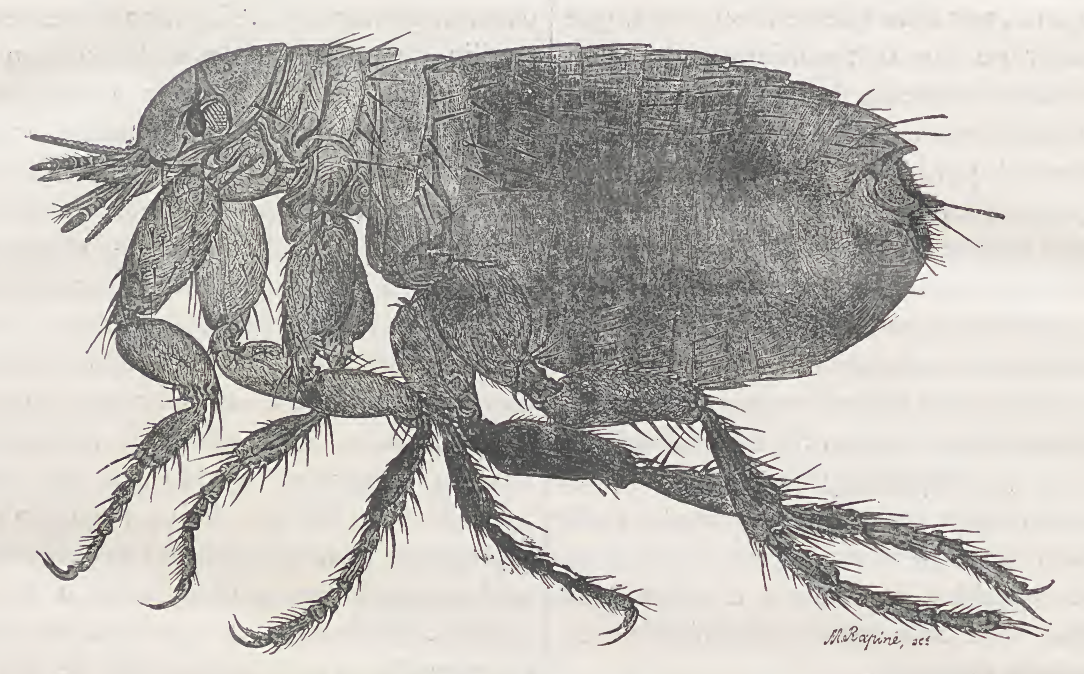



*Fig. 306.*—Una pulga. Copia de una fotografía microscópica

Largo tiempo se estuvo discutiendo el pro y el contra de esta cuestion, y harto se comprenderá cuán preciosos hubieran sido en esta circunstancia algunos documentos impersonales, como las fotografías, sobre todo tratándose de averiguar si habia habido ó no desaparicion de objetos préviamente representados.

Se ha concebido la idea de sacar vistas fotográficas de la Luna con intervalos de tiempo suficientemente largos para que, gracias al cambio motivado por la libracion, las pruebas se adaptasen á la vision estereoscópica. Observadas así las diferentes escabrosidades lunares presentan un relieve de extraordinaria nitidez, y la curvatura del hemisferio parece muy perceptible. Segun la teoría, este hemisferio debe estar alongado hácia la Tierra, y así parece resultar de la discusion de las mediciones micrométricas efectuadas por el astrónomo ruso Gussef sobre las pruebas de dos fotografías de la Luna. Warren de la Rue ha sacado tambien, con dos dias de intervalo, dos vistas fotográficas de una misma mancha solar; el exámen estereoscópico de las dos imágenes ha hecho patente la depresion de la superficie solar en el punto donde está situada la mancha.

No sólo se han hecho fotografías del Sol y de la Luna sino tambien de los planetas; Warren de la Rue, que fué el primero en hacer las

del segundo de dichos astros, ha fotografiado tambien á Saturno y Júpiter, y ha sacado vistas estereoscópicas del planeta Saturno y de su anillo. Por último, tambien les ha llegado su vez á las estrellas y á las nébulas y despues de varios ensayos infructuosos se ha estampado su imágen en el colodion. Rutherford ha podido fotografiar estrellas, hasta las de 9.ª magnitud, en ménos de tres minutos con un objetivo de tres pulgadas de diámetro. El tiempo de exposicion en estos experimentos no tan sólo variaba con las circunstancias atmosféricas, sino tambien con el brillo de las estrellas. La estrella binaria de Castor resultaba en medio segundo perfectamente reproducida. El mismo astrónomo ha fotografiado grupos estelares, como los de las Pléyades, el Pesebre, y Perseo. M. Gould, director del observatorio de Córdoba en la república argentina, ha logrado asimismo fotografiar muchos cúmulos de estrellas, entre otros el que rodea á *Eta* de Argos: la fotografía de este grupo contenia hasta 180 estrellas, muchas de las cuales no exceden de la 9.ª magnitud.

Estos resultados bastarian para demostrar cuántos servicios puede prestar la fotografía á la parte de la astronomía que tiene por objeto el estudio de los astros; pero tambien se la ha aplicado á observaciones de precision: durante el paso del planeta Vénus por el disco solar se hicieron varias veces numerosas fotografías á cada fase del paso; sin embargo, parece que esta tentativa no ha correspondido, como se hubiera podido creer, á las esperanzas concebidas por muchos astrónomos. Quizás se obtengan mejores resultados en el próximo paso, que ocurrirá en diciembre de 1882.

## III

### OTRAS APLICACIONES DE LA FOTOGRAFIA

La enumeracion que dejamos hecha de los servicios que la fotografía está llamada á prestar y que ha prestado ya á las ciencias y á las artes, no puede dar una idea perfecta de la progresiva importancia que esta aplicacion de la *fotoquímica* va adquiriendo en nuestras sociedades civilizadas. En la última exposicion francesa de fotografía figuraban notables muestras de las que vamos á hacer un rápido análisis para terminar este capítulo.

Hablemos ante todo de las aplicaciones científicas. La fotografía astronómica estaba representada allí por ejemplares daguerreotípicos del paso de Vénus por el Sol y por pruebas positivas de las manchas solares, así como por las hermosas fotografías lunares de Rutherford y Warren de la Rue; pero basta ya lo dicho acerca de este asunto. El observatorio de Kew expuso diagramas meteorológicos que indicaban las oscilaciones del barómetro de mercurio, las oscilaciones del termómetro de bola seca y de bola húmeda y por último las de los instrumentos magnéticos, que daban diariamente las componentes horizontal y vertical del magnetismo terrestre. Todos estos trazados se han obtenido por medio de la fotografía, de suerte que esta puede inscribir automáticamente y sin intermision los valiosos datos de la ciencia meteorológica.

Entre las muestras fotomicrográficas de historia natural, biología y entomología eran de notar las que tenian por objeto el estudio de la filoxera en sus diferentes fases de desarrollo. Pero, como particularidad notable, debemos hacer mencion de una serie de cuadros que representaban secciones del cerebro humano y de la médula espinal en su estado normal y en el patológico. Mediante estas fotografías, hechas por el doctor Luys, se podian comparar inmediatamente las regiones sanas y las regiones similares del sistema nervioso aquejadas de alguna enfermedad, y por consiguiente, formar al primer golpe de vista una idea exacta del grado de intensidad y de la extension de la degenerescencia morbosa. Considerada especialmente desde el punto de vista de la difusion de la enseñanza, esta reproduccion exactísima, casi imposible sin la fotografía, de las delicadas observaciones de la ciencia superior, tiene un alcance que el lector comprenderá fácilmente. Una de dichas fotografías representaba el cerebro de un amputado que habia sufrido la desarticulacion del hombro. «Todo el tiempo que el paciente ha vivido (veinte años), las regiones del cerebro que recibian las impresiones sensitivas de su brazo reseco, las que le comunicaba el movimiento voluntario permanecieron inmóviles, muertas, habiendo resultado de aquí



una atrofía localizada en ciertos puntos de la sustancia cerebral; y comparando esta fotografía con la inmediata, que representa el estado normal de las mismas regiones, llama desde luego la atencion la demostracion que se desprende de este exámen.» En otras pruebas se podia seguir con la vista el progreso de la desorganizacion de la sustancia nerviosa, á medida que la enfermedad iba invadiendo el organismo, en un caso de locura (parálisis general).

Así pues, la medicina, la cirugía y la fisiología tendrán en la micrografía fotográfica un nuevo y poderoso medio de investigacion.

Ya hemos dicho que el heliograbado es muy á propósito para la reproduccion de dibujos hechos de puntos, líneas y rayas de sombras, los cuales salen reproducidos con gran fidelidad, reducidos ó amplificados como se quiera. Por esto se comprenderá el partido que la cartografía podia sacar de tan preciosas propiedades, no siendo por lo mismo de extrañar que en la Exposicion de fotografía hubiese muchas muestras de mapas hechos de este modo. El atlas de los puertos de Francia, expuesto por la Escuela de puentes y caminos, se compone de cartas formadas por la reunion de las del Estado mayor por lo que respecta á los terrenos, de las de la Marina por lo que tiene relacion con las aguas y de varios planos á grande escala con referencia á las ciudades, puertos, etc. Estas cartas, grabadas en su orígen á diferentes escalas, se las ha reducido ante todo á una sola por medio de la fotografía, y en seguida se ha hecho una de todas ellas, recortándolas y pegándolas con habilidad suma; el conjunto constituia el original entregado al grabador. En este caso, la fotografía reemplaza al trabajo minucioso, complicado, difícil de los dibujantes que habrian tenido que hacer estas varias reducciones, y además es imposible incurrir en errores ó en olvidos, ahorrándose así una confrontacion ó compulsa siempre laboriosa (1).




*Fig. 307.*—Fotografía celeste.—Circos lunares.

(1) Los alemanes no dejaron de utilizar en 1870 este medio tan rápido de reproduccion. Véase lo que acerca de este punto dice H. Vogel en su obra titulada *Fotografía y química de la luz:* «Durante la guerra de Francia, las tropas invasoras necesitaban sobre todo mapas de los territorios que iban á ocupar. No se contaba con el gran número de mapas de Francia que eran menester para proveer de ellos á cuerpos de ejército enteros, ni tampoco es posible prepararlos ántes de estallar la guerra porque no se sabe de antemano la direccion que seguirán los ejércitos. La fotografía tiró entonces, con actividad asombrosa, millares de mapas, sirviendo de modelo un solo ejemplar. Tambien ha contribuido poderosamente á las victorias del ejército invasor, cuyos soldados, mapa en mano, conocian las localidades mejor que las mismas tropas francesas. Los hermanos Burchardt de Berlin se han distinguido especialmente en la ejecucion rápida de este trabajo, habiendo proporcionado hasta 500,000 mapas en el período de 1870-71.» Este es un ejemplo que se debe meditar é imitar en caso necesario.

Otras veces son el dibujo y el grabado los que se confía á la fotografía.

La fidelidad de las reproducciones fotográficas es provechosa en el más alto grado para ciertos trabajos, verbigracia para los estudios arqueológicos y paleográficos. Los viajeros encargados de misiones científicas pueden sacar rápidamente de este modo vistas de monumentos, reproducir con sus más minuciosos detalles las inscripciones antiguas que los individuos de

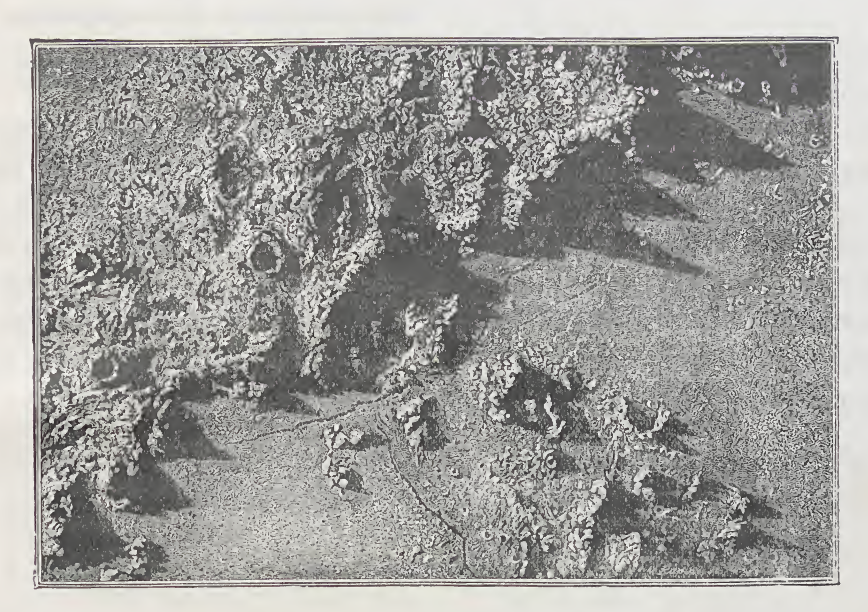


*Fig. 308.*—Fotografía celeste.— Montañas lunares

las Academias correspondientes podrán luégo discutir con todo sosiego, sin temor á los errores de un copista. La misma ventaja, la misma utilidad depara el arte en cuestion para el estudio de los textos más raros. Véase lo que dice acerca de este punto el ilustrado director de la Biblioteca nacional, M. Leopoldo Delisle:

«La fotografía debia causar una revolucion en

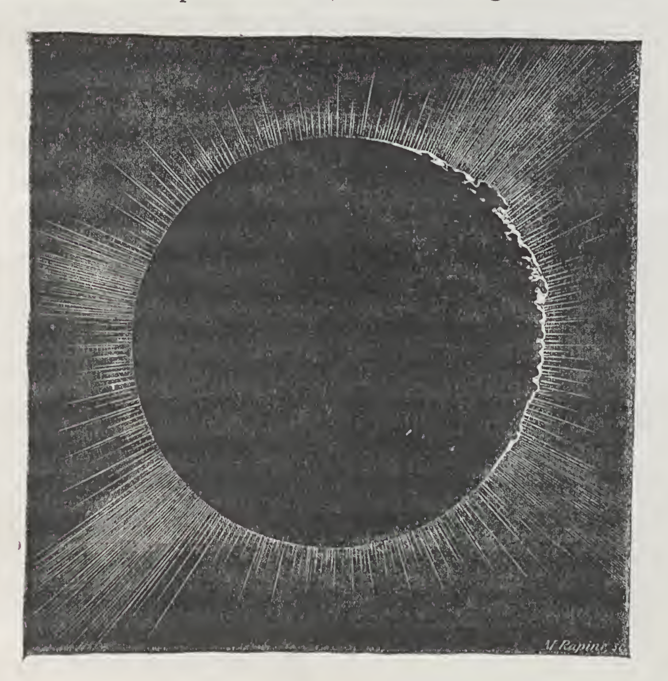


*Fig. 309.*—Copia fotográfica de un eclipse de Sol

los estudios paleográficos. En adelante se podrán reproducir con rigurosa exactitud los manuscritos más importantes, desde la primera hasta la última página, y dia llegará en que las grandes bibliotecas tengan copias fieles de algunos de esos libros antiguos de que se envanecen con justicia las de Roma, Florencia, Milan, Viena, Paris y Lóndres. El Museo Bri-

tánico acaba de publicar una edicion poco costosa del Salterio de la Universidad de Utrecht, en cuya edicion se pueden estudiar con confianza los más curiosos monumentos de la caligrafía y del dibujo en los siglos octavo y noveno.»

Las varias administraciones públicas empiezan á aprovechar los recursos que ofrece la fotografía. Hace ya algunos años que la policía se vale de este medio para comprobar la identidad de los individuos sometidos por la ley á su vigilancia ó de los criminales á quienes se supone reincidentes. La justicia civil recurre á la fotografía en casos especiales cuando se trata de producir piezas que sirvan de testimonio en los procesos, por ejemplo, las copias fotográficas de los testamentos. En las causas criminales puede suministrar documentos de gran importancia para ilustrar á los jurados y jueces, como la comprobacion de los lugares, retratos y situacion de las víctimas y de los criminales, comprobacion de documentos falsificados mediante su amplificacion, y reproduccion de escritos borrosos.

Estos ejemplos, que podríamos multiplicar fácilmente, prueban que la fotografía no tan sólo presta servicios á las artes y á las ciencias, sino que se va convirtiendo de dia en dia en un elemento de informes indispensables á las administraciones públicas, por cuyo concepto llegará sin duda á adquirir verdadera importancia social.

FIN DEL TOMO SEGUNDO

# INDICE

## DE LOS CAPITULOS DEL TOMO SEGUNDO

### LA LUZ






EL MUNDO
FISICO
2